



Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construção
Urbana

**Misturas Betuminosas Temperadas, do tipo SMA,
com Incorporação de Material Betuminoso
Reciclado: Contribuição para Avaliação de
Desempenho Mecânico**

Tese apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
Especialização em Construção Urbana

Autor

Bruno Miguel de Almeida Carvalho

Orientador

Prof. Doutor Silvino Dias Capitão

Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Civil
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, dezembro, 2016

“Viver não é necessário; o que é necessário é criar.”

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças à intervenção, direta e indireta, de várias pessoas e entidades, pelos quais expresso nestas linhas o meu mais sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, ao Professor Doutor Silvino Dias Capitão, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pela sua enorme disponibilidade e determinação demonstrada, pela sua amizade e entusiasmo, pela sua transmissão de conhecimento, pelos seus conselhos e motivação a mim inculcida, que foram fundamentais na chegada deste trabalho a bom porto.

À empresa Contec, na pessoa da Engenheira Filipa Gomes, pelo fornecimento do material fresado e do betume e à empresa JRS, na pessoa do Doutor Fernando Martinho, pelo fornecimento das fibras celulósicas. Sem esta preciosa ajuda este trabalho científico não poderia ter sido elaborado. À empresa IPC Global Austrália, pelo apoio na resolução dos problemas surgidos durante os trabalhos laboratoriais.

Ao Engenheiro Carlos Renato Rodrigues, técnico do Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pela amizade, apoio e motivação, nos infindáveis dias de trabalho em laboratório, cruciais na elaboração deste trabalho.

Ao Senhor Celestino Marques, técnico do Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, pela amizade e pelo apoio prestado na resolução dos mais variados problemas ocorridos durante esta jornada.

À minha colega de trabalho, Daniela Antunes, pela entreaajuda e pela enorme disponibilidade demonstrada ao longo dos trabalhos laboratoriais. Este trabalho também é dela.

À Carolina, a todos os meus colegas e amigos, que me vêm apoiando durante esta caminhada longa de vida académica e não só. O meu muito obrigado a todos eles.

Por último, o meu agradecimento à minha família. Ao meu pai e à minha mãe, pelo apoio incondicional, à minha irmã e à minha avó. E à memória de todos os meus entes queridos, que sempre acreditaram em mim e me fizeram tornar naquilo que sou hoje.

Bruno Miguel de Almeida Carvalho

Coimbra, dezembro de 2016

RESUMO

Um dos maiores desafios da humanidade nos dias de hoje é a confrontação com as mudanças climáticas no nosso planeta. Tem havido, ao longo das últimas quatro décadas, cimeiras e conferências sobre esta temática, e acordos e tratados foram assinados desde então.

A indústria dos pavimentos rodoviários é bastante dependente das indústrias de extração de petróleo e de rocha. E nesse sentido têm vindo a ser desenvolvidos esforços no sentido de procurar novos caminhos mais ecológicos e sustentáveis na produção de misturas betuminosas.

As Misturas Betuminosas Temperadas (MBT) têm sido o foco principal de estudo face à problemática das emissões de gases poluentes. Além disso, a reciclagem de pavimentos, através do aproveitamento de material proveniente de fresagem, pode ser um bom complemento à eficiência energética das misturas temperadas, como também representar um procedimento responsável pela reutilização de materiais, contribuindo para a sustentabilidade económica e ambiental. Aliada a estes fatores, a manutenção das vias é uma tarefa muitas vezes menosprezada pelas entidades gestoras, mas que compõe uma importante parcela do custo total de uma rodovia. Nesse sentido, optou-se por estudar o *Stone Mastic Asphalt* (SMA), um tipo de mistura betuminosa com um longo ciclo de vida e boas características mecânicas, mas que tem tido uma utilização esporádica no nosso país.

Este estudo procura caracterizar misturas do tipo SMA através da formulação empírica Marshall, já estudada num trabalho anterior para as mesmas misturas, e através de ensaios de desempenho mecânico, como a avaliação da sensibilidade à água, avaliação da resistência à deformação permanente e avaliação do módulo de rigidez.

Este estudo pretende divulgar e contribuir para um melhor conhecimento sobre este tipo de mistura, mostrando as suas potencialidades e as suas limitações de forma a que, no futuro, as SMA possam ser utilizadas com mais critério e segurança.

Palavras-Chave

Aditivos orgânicos, Aquecimento Global, Fendilhamento por Fadiga, Fibras celulósicas, Formulação Empírica de Misturas, Módulo de Rigidez, Resistência à Deformação Permanente, Stone Mastic Asphalt (SMA), Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR), Misturas Betuminosas Temperadas (MBT), Sustentabilidade económica e ambiental.

ABSTRACT

One of the greatest challenges of humanity nowadays is the confrontation with climate changes on our planet. There has been summits and conferences on this subject over the last four decades, and agreements and treaties have been signed since then.

The road pavement industry is quite dependent of oil and rock extraction industries. Efforts have been made to find more ecological and sustainable ways of producing asphalt mixtures.

Warm-mix asphalts (WMA) have been the main focus of study in what concerns the emissions of pollutant gases. In addition, the recycling of pavements, through the use of material from milling, can be a good complement to the energy efficiency of warm-mixes, as well as being a procedure responsible by reusing materials, contributing to the economic and environmental sustainability. Allied to these factors, the maintenance of roads is a task often overlooked by the administrations despite it is an important part of the total cost of a highway. Thus, it was decided to study Stone Mastic Asphalt (SMA), which is a type of asphalt mixture with a long life cycle and a good mechanical performance, despite it has had a sporadic use in our country.

This study aims to characterize SMA mixtures through the Marshall empirical mix-design, already studied in a previous work for the same mixtures, and through mechanical performance tests, such as the evaluation of moisture sensitivity, resistance to rutting and stiffness modulus.

This study intends to spread and contribute to a better knowledge about this type of mixture, showing its potentialities and its limitations so that, in the future, these can be used with more discretion and safety.

Key-Words

Cellulosic Fibers, Economic and Environmental Sustainability, Empirical mix-design, Fatigue Resistance, Global Warming, Organic Additives, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Rutting Resistance, Stiffness Modulus, Stone Mastic Asphalt (SMA), Warm Mixture Asphalt (WMA).

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos e Metodologia.....	2
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Enquadramento	5
2.2	A evolução da tecnologia de Misturas Betuminosas Temperadas e da Mistura Stone Mastic Asphalt	6
2.2.1	Misturas Betuminosas Temperadas	6
2.2.2	Stone Mastic Asphalt.....	8
2.3	Tecnologias de produção de Misturas Betuminosas Temperadas e caracterização da composição das misturas do tipo Stone Mastic Asphalt	9
2.3.1	Tecnologias de produção de Misturas Betuminosas Temperadas	9
2.3.2	Composição da mistura Stone Mastic Asphalt	12
2.4	Vantagens e desvantagens da utilização de Misturas Betuminosas Temperadas	14
2.4.1	Vantagens técnicas	14
2.4.2	Vantagens económicas	14
2.4.3	Vantagens ambientais	15
2.4.4	Vantagens para trabalhadores e envolvente de trabalho.....	16
2.4.5	Desvantagens na utilização de Misturas Betuminosas Temperadas....	16
2.5	Vantagens e desvantagens da utilização de Misturas do tipo Stone Mastic Asphalt...	17
2.6	Considerações sobre a Incorporação de Material Betuminoso Reciclado (MBR) em Misturas Betuminosas Temperadas (MBT)	18
3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUENTES E FORMULAÇÃO DA MISTURA.....	19
3.1	Enquadramento	19
3.2	Materiais constituintes	19

3.2.1	Seleção de agregados e análise granulométrica	19
3.2.2	Ligante.....	25
3.2.3	Aditivos e fibras	25
3.3	Formulação da mistura betuminosa – Formulação Marshall.....	26
3.3.1	Considerações iniciais	26
3.3.2	Fabrico de provetes e determinação da Baridade	26
3.3.3	Ensaio de compressão Marshall	27
3.3.4	Caracterização volumétrica e percentagem ótima de betume	28
3.4	Ensaio de Schellenberg – Avaliação do Escorrimento de Betume	33

4 ENSAIOS DE DESEMPENHO MECÂNICO 35

4.1	Enquadramento	35
4.2	Estudo da Sensibilidade à Água – Resistência Conservada	35
4.3	Avaliação da resistência à deformação permanente	37
4.3.1	Considerações Iniciais	37
4.3.2	Fabrico e Características dos provetes de ensaio	37
4.3.3	Condições de ensaio, sua execução e resultados obtidos	40
4.4	Avaliação do módulo de rigidez	45
4.4.1	Condições Iniciais	45
4.4.2	Fabrico e Características dos provetes de ensaio	45
4.4.3	Condições de ensaio, sua execução e resultados obtidos	48
4.4.4	Análise do módulo de rigidez pelo modelo de previsão da Shell	56
4.5	Análise de resultados	59
4.5.1	Considerações Iniciais	59
4.5.2	Estabilidade Marshall	59
4.5.3	Deformação Permanente	60
4.5.4	Módulo de Rigidez	64
4.5.5	Avaliação da resistência ao fendilhamento através do Método de previsão da Shell	69
4.6	Considerações Finais	72

5 CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS..... 73

5.1	Síntese do Trabalho e Conclusões Gerais.....	73
5.2	Prosseguimento de Trabalhos Futuros.....	75
5.3	Considerações Finais	76

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
REFERÊNCIAS NORMATIVAS	83
APÊNDICES.....	85
APÊNDICE I. Estudo da Mistura betuminosa	87
➤ Estudo da mistura betuminosa – Formulação Marshall.....	87
➤ Estudo da mistura betuminosa – Propriedades Volumétricas.....	88
➤ Estudo da mistura betuminosa – Compressão Marshall	89
APÊNDICE II. Avaliação de desempenho mecânico	91
➤ Resistência à Deformação Permanente.....	93
➤ Avaliação do Módulo de Rigidez	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Utilização de MBT na Noruega até aos dias de hoje (adaptado de EAPA, 2015)..	8
Figura 2.2 Tecnologias de produção de misturas betuminosas classificadas através da temperatura de fabrico (adaptado de FHWA, 2008).....	10
Figura 2.3 Esquema representativo da transferência de tensões entre os agregados (à esquerda) (Martinho et al, 2013) e limites à curva granulométrica, impostos pela norma EN 13108-5 (à direita).....	12
Figura 2.4 Esquema representativo do fenómeno de escorrimento do betume (à esquerda) e esquema de representativo da ação das fibras estabilizadoras no betume (à direita) (Martinho et al, 2013)	13
Figura 2.5 Representação do aspeto interno de uma mistura SMA em contraponto com as misturas tradicionais (à esquerda) (Highway1, 2016), e macro textura superficial de um SMA aplicado em obra (à direita) (Prowell et al, 2009).....	13
Figura 3.1 Limites de fuso granulométrico de acordo com a norma EN 13108-5 para SMA12,5	22
Figura 3.2 Granulometria das várias frações granulométricas	23
Figura 3.3 Comparação entre curvas granulométricas para SMA 12,5	24
Figura 3.4 Comparação entre a curva granulométrica da mistura com propostas normativas estrangeiras	24
Figura 3.5 Composição do produto <i>VIATOP® plus CT 40</i> (adaptado de JRS, 2015)	25
Figura 3.6 Representação dos vários constituintes da mistura. Da esquerda para a direita: agregados virgens, MBR, betume novo e aditivo	27
Figura 3.7 Ensaio de compressão Marshall.....	28
Figura 3.8 Preparação e pesagem dos provetes Marshall (Antunes, 2016)	29
Figura 3.9 Determinação de baridade máxima teórica com o picnómetro de vácuo	30
Figura 3.10 Representação gráfica da características da mistura betuminosa em função da percentagem de betume dos provetes Marshall	32
Figura 4.1 Equipamento de compactação vibratória em molde com recurso a martelo	37
Figura 4.2 Modelo de tensões atuante [adaptado de (Buchanam, 2007)] e aspeto geral do ensaio	40
Figura 4.3 Esquema de deformação em resposta a carga dinâmica (adaptado de EN 12697 - 25)	41
Figura 4.4 Relação entre a altura dos provetes e a sua deformação.....	42
Figura 4.5 Andamento das curvas de deformação ao longo do ensaio (valores médios)	44

Figura 4.6 Esquema de ensaio de tração indireta em provetes cilíndricos (IT-CY) e do ensaio de flexão em 4 pontos de provetes prismáticos (4PB-PR), adaptado de EN 12697-26	45
Figura 4.7 Aspeto geral dos provetes de 100mm de diâmetro (à esquerda) e 150mm de diâmetro (à direita), ensaiados à tração indireta (IT-CY).....	46
Figura 4.8 Aspeto de laje e provetes prismáticos usados no ensaio 4PB-PR	47
Figura 4.9 Onda de carregamento e onda de deformação, adaptado de EN 12697-26.....	48
Figura 4.10 Montagem do ensaio de tração indireta (IT-CY) para determinação do módulo de rigidez e modelo exemplificativo (adaptado de EN 12697-26).....	51
Figura 4.11 Representação gráfica da relação entre a frequência de carregamento e o módulo de rigidez, e a tensão atuante para provetes de 100mm de diâmetro e deformação alvo de 5 μ m	53
Figura 4.12 Representação gráfica da relação entre a frequência de carregamento e o módulo de rigidez, e a tensão atuante para provetes de 150mm de diâmetro e deformação alvo de 7 μ m	54
Figura 4.13 Representação gráfica do módulo de rigidez, E, tensão atuante, σ e ângulo de fase, ϕ , de acordo com a variação da frequência de carregamento.	56
Figura 4.14 Representação gráfica da variação do módulo de rigidez consoante a variação da frequência de carregamento para as características dos provetes ensaiados, de acordo com o Método da <i>Shell</i>	58
Figura 4.15 Valores de estabilidade e deformação Marshall	59
Figura 4.16 Relação grafica entre a deformação axial acumulada e a taxa de formação em relação à percentagem de betume	60
Figura 4.17 Representação gráfica dos resultados dos parametros ϵ_n e f_c em função da porosidade da mistura.....	61
Figura 4.18 Comparação do parametro f_c em o parametro do ensaio <i>Whell Tracking</i> , WTS_{air} observados nos estudos de Gardete (Gardete, 2016) e Antunes (Antunes, 2014).....	63
Figura 4.19 Gráfico comparativo de valores de ϵ_{3600} entre misturas ensaiadas à compressão uniaxial com cargas cíclicas segundo a norma EN 12697-25	64
Figura 4.20 Representação gráfica da relação entre a percentagem de betume e módulo de rigidez para provetes de 100mm de diâmetro e deformação alvo de 5 μ m	65
Figura 4.21 Representação gráfica da relação entre a percentagem de betume e módulo de rigidez para provetes de 150mm de diâmetro e deformação alvo de 7 μ m	65
Figura 4.22 Variação do módulo de rigidez de acordo com a porosidade para provetes de 100mm de diâmetro (à esquerda) e provetes de 150mm de diâmetro (à direita)	66
Figura 4.23 Representação grafica da variação do módulo de rigidez, para os provetes de 100m e 150mm de diametro, conforme a porosidade.....	66
Figura 4.24 Estudo comparativo de módulos de rigidez, a 20°C	68
Figura 4.25 Gráfico comparativo entre misturas ensaiadas à tração indireta por compressão diametral (IT-CY) segundo a norma EN 12697-26.....	69
Figura 4.26 Leis de Fadiga Shell	71

ÍNDICE DE FIGURAS EM APÊNDICE

Figura II.1 Representação gráfica da deformação acumulada de cada provete ao longo dos ciclos de ensaio (para provetes seleccionados)	95
---	----

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 Dados relativos à redução de emissões com Misturas Betuminosas Temperadas, em percentagem [adaptado de (FHWA, 2008)]	15
Quadro 3.1 Propriedades dos agregados de granulometria 4/12,5 mm.....	20
Quadro 3.2 Propriedades dos agregados de granulometria 0/4 mm.....	20
Quadro 3.3 Propriedades do fíler	21
Quadro 3.4 Limites do fuso granulométrico para misturas <i>Stone Mastic Asphalt</i> (adaptado de EN 13108-5: 2006)	21
Quadro 3.5 Análise granulométrica dos agregados usados na formulação da mistura	22
Quadro 3.6 Percentagem das frações de agregados	23
Quadro 3.7 Conformidade das propriedades do betume 35/50	25
Quadro 3.8 Resumo dos valores calculados para a formulação Marshall.....	31
Quadro 3.9 Resumo de características da mistura betuminosa para a percentagem ótima de betume.....	33
Quadro 4.1 Categorias de ITSR constantes na norma EN 13108-1, relativas ao ensaio de sensibilidade à água	36
Quadro 4.2 Altura e diâmetro medidos dos provetes ensaiados	38
Quadro 4.3 Dimensões e baridade dos provetes ensaiados	38
Quadro 4.4 Baridade máxima teórica, porosidade, VMA e VFB médios por percentagem de betume.....	39
Quadro 4.5 Comparação dos valores de baridade e baridade máxima teórica obtidos para os provetes compactados por vibro-compressão ($\phi 150\text{mm}$) e para os provetes Marshall ($\phi 100\text{mm}$)	39
Quadro 4.6 Comparação dos valores de porosidade, VMA e VFB obtidos para os provetes compactados por vibro-compressão ($\phi 150\text{mm}$) e para os provetes Marshall ($\phi 100\text{mm}$)	39
Quadro 4.7 Altura e deformação axial acumulada para todos os provete ensaiados	42
Quadro 4.8 Resultados obtidos para o ensaio à deformação permanente	43
Quadro 4.9 Características geométricas e baridade média por percentagem de betume	46
Quadro 4.10 Valores médios de baridade, baridade máxima teórica, porosidade, VMA e VFB por percentagem de betume para os provetes de 150mm de diâmetro	47
Quadro 4.11 Características geométricas e baridade média para provetes prismáticos.....	47
Quadro 4.12 Representação dos valores de frequência correspondente aos tempos de carga e da velocidade de circulação do tráfego.....	50

Quadro 4.13 Condições gerais de ensaio do ensaio IT-CY	50
Quadro 4.14 Resultados médios obtidos para o valor do módulo de rigidez e para a tensão atuante de acordo com a variação de frequência de carregamento e da percentagem de betume	52
Quadro 4.15 Condições gerais do ensaio de avaliação do módulo de rigidez em ensaios 4PB-PR	55
Quadro 4.16 Resultados médios obtidos para o valor do módulo de rigidez, tensão atuante e ângulo de fase, de acordo com a variação de frequência de carregamento	55
Quadro 4.17 Parâmetros característicos de penetração a 25°C e temperatura de amolecimento de anel e bola dos betumes contidos na mistura	57
Quadro 4.18 Características volumétricas da mistura, de acordo com o Método da Shell....	58
Quadro 4.19 Valores de desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados de provetes ensaiados à resistência à deformação permanente	62
Quadro 4.20 Medidas de dispersão dos resultados dos módulos de rigidez obtidos	67
Quadro 4.21 Quadro resumo de parâmetros a aplicar na lei de fadiga da Shell e N_{80} calculados a partir das deformações impostas	70
Quadro 4.22 Leis de fadiga e cálculo de ϵ_6	71

ÍNDICE DE QUADROS EM APÊNDICE

Quadro I.1 Composição dos provetes Marshall	87
Quadro I.2 Massas volúmicas dos materiais utilizados na mistura.....	87
Quadro I.3 Cálculo da baridade dos provetes Marshall	88
Quadro I.4 Cálculo da baridade, da baridade máxima teórica, da porosidade, do VMA e do VFB dos provetes Marshall	88
Quadro I.5 Resultados do ensaio de Compressão de Marshall	89
Quadro II.6 Composição dos provetes Marshall	91
Quadro II.7 Cálculo da baridade dos provetes Marshall para o ensaio de avaliação da sensibilidade à água	91
Quadro II.8 Resultados do ensaio de tração indireta e determinação de ITRS	92
Quadro II.9 (Continuação) – Resultados do ensaio de tração indireta e determinação de ITRS	92
Quadro II.10 Propriedades geométricas e volumétricas dos provetes selecionados, ensaiados à deformação permanente	93
Quadro II.11 Parâmetros de deformação permanente dos provetes ensaiados e selecionados	94
Quadro II.12 Quadro comparativo de ensaios de outros autores à deformação permanente ..	96
Quadro II.13 Propriedades geométricas e volumétricas dos provetes de 150 mm de diâmetro, ensaiados à avaliação do módulo de rigidez	97
Quadro II.14 Quadro resumo do ensaio de avaliação do módulo de rigidez (IT-CY), dos provetes de 100 mm de diâmetro, para 1 Hz de frequência.....	98
Quadro II.15 Quadro resumo do ensaio de avaliação do módulo de rigidez (IT-CY), dos provetes de 100 mm de diâmetro, para 2 Hz de frequência.....	99
Quadro II.16 Quadro resumo do ensaio de avaliação do módulo de rigidez (IT-CY), dos provetes de 100 mm de diâmetro, para 3 Hz de frequência.....	100
Quadro II.17 Quadro resumo do ensaio de avaliação do módulo de rigidez (IT-CY), dos provetes de 150 mm de diâmetro, para todas as frequências.....	101
Quadro II.18 Características geométricas e baridade das vigas ensaiadas à avaliação do módulo de rigidez por 4PB-PR.....	102
Quadro II.19 Resultados do ensaio de avaliação do módulo de rigidez por 4PB-PR.....	102
Quadro II.20 Quadro comparativo de ensaios de outros autores à avaliação do módulo de rigidez por IT-CY	103

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

4PB-PR – Ensaio de flexão em quarto pontos em provetes prismáticos
AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials
AC – Asphalt Concrete
AC – TL/BBTM – Asphalt Concrete – Thin Layers / Béton Bitumineux Très Mince
BB – Betão Betuminoso
D – Dimensão máxima do agregado
d – Dimensão mínima do agregado
E – Módulo de Rigidez
EAPA – European Asphalt Pavement Association
EN – European Norm (Norma Europeia)
EP – Estradas de Portugal
 ϵ_t – extensão de tração
et al. – et alii (e outros)
EUA – Estados Unidos da América
F - Força
fc – Taxa de deformação
FHWA – Federal Highway Administration
FI – Índice de achatamento dos materiais granulares
GEE – Gases com Efeito de Estufa
IT-CY – Ensaio de tração indireta em provetes cilíndricos (Indirect Tensile Test)
ITSR – Índice de resistência conservada em tração indireta (Indirect Tensile Strength Ratio)
ITR_w - resistência a tração indireta dos provetes acondicionados em água;
ITR_d - resistência à tração indireta dos provetes a seco;
ITSR - resistência conservada em tração indireta.
LEA – Low Energy Asphalt
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MAM – Misturas de alto módulo
MB_F – Valor de azul metileno
MBF – Misturas Betuminosas a Frio
MBQ – Mistura Betuminosa fabricada a Quente
MBR – Mistura Betuminosa Recuperada
MBT – Mistura Betuminosa Temperada
MDE – Coeficiente micro-Deval
NAPA – National Asphalt Pavement Association

NCHRP – National Cooperative Highway Research Program

ND – Não Determinado

NP – Norma Portuguesa

N₈₀ – número de eixos padrão de 80 kN

PA – Porous Asphalt

PSV – Polished Stone Value

RAP – Recycled Asphalt Pavement

RDAIR – Profundidade da Rodeira, ao fim de N ciclos (rut depth)

SI – Índice de forma dos materiais granulares

S_m – Módulo de rigidez (lei de fadiga Shell)

SMA – Stone Mastic Asphalt, Stone Matrix Asphalt

TWG – Technical Work Group

V_b – percentage volumétrica de betume no volume total

VFB – Volume de vazios preenchidos por betume (Voids Filled with Binder)

V_m - Porosidade

VMA – Volume de vazios na Mistura de Agregados

WA – Categoria para a absorção de água dos materiais granulares

WMA – Warm Mix Asphalt

WTSAIR – Taxa de deformação em ensaio de pista (wheel tracking slope)

ε_n – Deformação permanente acumulada ao fim de 3600 ciclos de carga

μ_ε - Microdeformação (Microstrain)

ρ_a – Massa volúmica do material impermeável das partículas

ρ_b - Baridade

ρ_{bsea} – Baridade de um provete, ou carote, de mistura betuminosa, com superfície selada

PHA - hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

ρ_{mc} – Baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa determinada pelo procedimento matemático

ρ_{mv} – Baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa determinada pelo procedimento volumétrico

ρ_{rd} – Massa volúmica das partículas secas em estufa

ρ_{sm} – Massa volúmica do material de selagem à temperatura do ensaio

ρ_{ssd} – Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura do ensaio

σ – Tensão

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Neste trabalho pretende-se caracterizar uma mistura com especificidades não muito comuns comparativamente às chamadas misturas betuminosas tradicionais a quente.

Na atualidade surgem novos desafios para a humanidade, como é o caso da ameaça das alterações climáticas, as quais exigem novas formas de realizar muitas das atividades humanas.

Desde 1972, na Conferencia de Estocolmo, que a problemática do aquecimento global e das emissões de gases poluentes para a atmosfera têm sido tema de debate. A cimeira do Rio de Janeiro de 1992, foi o primeiro grande marco na tentativa de combater este problema. O Protocolo de Quioto, em 1997, colocou em prática aquilo que já tinha vindo a ser discutido desde 1992, embora o protocolo de 1997 só tenha sido ratificado em 2005. Este protocolo revelou-se um fracasso, com as metas restritivas às emissões a não serem cumpridas. No seu seguimento, encontra-se em vigor o Acordo de Paris. No entanto, alguns estudos apontam para uma estimativa de não cumprimento das suas metas no futuro.

Os esforços da comunidade científica mundial também têm convergido neste sentido. A indústria da pavimentação de rodovias, sendo dependente de recursos não renováveis e altamente poluentes, não foge à regra e, ao longo das últimas duas décadas, tem obtido progressos consideráveis no estudo de tecnologias amigas do ambiente e na racionalização da utilização de recursos.

O foco da investigação científica no domínio das rodovias tem convergido para a diminuição da temperatura de fabrico das misturas betuminosas, na tentativa de diminuir o consumo de energia e diminuir a emissão de gases poluentes para a atmosfera, e para o reaproveitamento de material recuperado de obras de reabilitação, promovendo a reciclagem de materiais.

O esforço de aumento da vida útil de um pavimento também é importante, pois quanto mais longa for esta, menos recursos serão globalmente gastos. Portanto, todas estas tecnologias sustentáveis só terão viabilidade se o desempenho dos pavimentos for, no mínimo, similar aos das misturas betuminosas tradicionais a quente.

Neste sentido, é objeto de estudo neste trabalho uma mistura betuminosa temperada (MBT), do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), com incorporação de 20% de material betuminoso recuperado de pavimentos em reabilitação (MBR). As misturas SMA são conhecidas pelas suas excelentes propriedades mecânicas.

1.2 Objetivos e Metodologia

Este trabalho tem como objetivo a caracterização de uma Mistura Betuminosa Temperada, do tipo *Stone Mastic Asphalt*, com incorporação de material betuminoso recuperado e com adição de ceras e fibras celulósicas. A caracterização é feita através da avaliação das suas propriedades volumétricas e da avaliação do seu desempenho mecânico.

Também é objetivo deste trabalho sintetizar informação, a recolher na literatura, relativa às tecnologias das misturas betuminosas temperadas e às especificidades da composição de misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt*, assim como, no que se refere às condições de incorporação de material reciclado neste tipo de mistura.

A metodologia do trabalho assenta num estudo experimental, o qual se baseia, por um lado, numa formulação empírica de Marshall e na determinação das propriedades volumétricas das misturas a produzir e, por outro lado, na avaliação das suas características mecânicas, como é o caso da avaliação da sensibilidade à água, da resistência à deformação permanente e do módulo de rigidez.

Complementarmente, a metodologia de trabalho foca-se na análise comparativa de resultados com os obtidos noutros estudos similares, e também com métodos de previsão de propriedades mecânicas, como é o caso do Método da Shell, de modo a evidenciar o que pode esperar-se do desempenho de MBT, do tipo SMA, com incorporação de MBR.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação divide-se em seis capítulos, contando ainda com quatro apêndices, cujo conteúdo se apresenta a seguir.

No Capítulo 1, faz-se uma introdução à temática abordada na dissertação, definem-se os seus objetivos, descreve-se a metodologia aplicada e apresenta-se a estrutura do documento.

No Capítulo 2, é explicada a tecnologia de redução de temperatura de fabrico das misturas betuminosas temperadas, incluindo uma nota histórica e evolutiva da tecnologia até ao presente, apresentam-se os mecanismos que permitem a redução da temperatura, e analisam-se as vantagens e desvantagens das MBT. Apresentam-se ainda algumas considerações relativas à incorporação de MBR em MBT. Neste capítulo analisam-se também aspetos relativos à composição geral de misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt*, à caracterização dos seus constituintes e às vantagens e desvantagens da sua utilização.

No Capítulo 3 são apresentados os constituintes das misturas analisadas no caso de estudo. É feita a seleção da granulometria da mistura de agregados utilizada, e são apresentados os resultados das propriedades volumétricas das composições em estudo. É, ainda, aplicado o método de formulação Marshall e determinada a percentagem ótima de betume. A finalizar este capítulo é apresentado o resultado do ensaio de escorrimento do betume nas composições SMA estudadas.

No Capítulo 4, são apresentados os ensaios mecânicos complementares à formulação Marshall, designadamente a avaliação da sensibilidade à água das misturas, a sua resistência à deformação permanente, os seus módulos de rigidez e a sua resistência à fadiga. É também feita uma análise dos resultados obtidos nos ensaios de avaliação das propriedades mecânicas e das propriedades volumétricas, e são estabelecidas análises comparativas com resultados de outros estudos.

No Capítulo 5, faz-se uma síntese conclusiva do trabalho desenvolvido, resumindo as principais conclusões obtidas, e referem-se sugestões para a realização de possíveis trabalhos futuros que possam aprofundar o estudo desenvolvido no âmbito da presente dissertação.

Os quatro apêndices apresentam informação complementar à incluída nos capítulos e que se descreve sumariamente a seguir

- O Apêndice I apresenta as propriedades dos agregados utilizados para fabricar as misturas em estudo;
- O Apêndice II resume os resultados da formulação Marshall, das propriedades volumétricas e da sensibilidade à água das misturas betuminosas;
- O Apêndice III mostra os resultados dos ensaios de desempenho mecânico das misturas betuminosas;
- O Apêndice IV apresenta os resultados de desempenho mecânico representados na forma gráfica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Enquadramento

No quadro dos desafios internacionais da atualidade, talvez o que mais se destaque, seja a necessidade de implementar medidas que levem à sustentabilidade ambiental do nosso planeta. Ao longo de mais de quatro décadas, esta problemática tem estado presente na nossa sociedade, podendo causar danos severos, no médio ou longo prazo, no equilíbrio do nosso planeta.

A indústria contribui em muito para a emissão de gases poluentes para a atmosfera, e têm surgido esforços nas últimas décadas para mitigar este problema, seja através de controlo e monitorização, seja através da introdução de novas tecnologias.

Em 1997, na Conferência das Partes 3, foi discutido e negociado o Protocolo de Quioto que visava a diminuição, até 2012, em 5,2% da emissão de gases com efeito de estufa, em relação aos valores de 1990. Só em 2005 se conseguiu que aquele Protocolo entrasse em vigor através da ratificação por parte da Federação Russa, totalizando assim um total de 55 países que representem, pelo menos, 55% da emissão de gases com efeito de estufa a nível mundial. Entre os países que não ratificaram este acordo destacam-se os EUA, que alegaram danos na sua economia para a rejeição. No entanto, têm sido conduzidos esforços neste país no sentido de diminuir a emissão de gases com efeito de estufa através da aplicação de novas tecnologias, não comprometendo as margens de lucro da produção. Após o falhanço das metas estipuladas no Protocolo de Quioto, em 2012, a emenda de Doha, estabelece a prorrogação do prazo até 2020. Em novembro de 2016 é ratificado por 94 nações, até à data, o Acordo de Paris de 2015, o qual estabelece um limite de aumento de temperatura da superfície do planeta de 2°C acima da temperatura no período pré-industrial. No entanto, existe a recomendação para que todos os esforços sejam dirigidos no sentido de manter aquele aumento abaixo de 1,5°C (Proclima, 2016).

O sector da indústria dos pavimentos rodoviários é maioritariamente dependente de produtos derivados do petróleo, como é o caso do betume asfáltico, e da extração de rocha para produção de agregados virgens. Uma das tecnologias do setor para reduzir estas dependências e, consequentemente, a emissão de gases poluentes para a atmosfera é a tecnologia das Misturas Betuminosas Temperadas (MBT) com incorporação de Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR). Esta tecnologia tem como base, por um lado, a diminuição da temperatura de fabrico das misturas betuminosas até 40°C e, por outro, a reutilização/reciclagem de material proveniente da fresagem de rodovias em reabilitação.

A construção de pavimentos rodoviários com uma vida útil mais longa é também importante na ótica da utilização responsável de recursos. Um pavimento com boas características mecânicas, utilizado com critério, deverá ser mais caro no seu investimento inicial mas poderá também durar mais, aumentando a periodicidade da sua reabilitação e consequentemente, baixar custos a médio ou longo prazo, contribuindo assim para a diminuição de consumo de matérias-primas, como agregados de rocha virgens e ligante. As misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt* têm sido utilizadas, exatamente, pela expectativa da sua maior durabilidade (Vargas-Nordbeck, 2007).

As misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), originárias da Alemanha, têm sido largamente difundidas e aplicada com êxito um pouco por todo o mundo. No entanto, em Portugal, esta mistura não tem sido utilizada muito frequentemente.

As SMA têm características peculiares e, fruto do seu desempenho, têm potencial de desenvolvimento e aplicação em vias com solicitações de tráfego severas, pelo seu elevado desempenho, sendo especialmente utilizada em camadas de desgaste de aeroportos e vias solicitadas por tráfego pesado (Martinho et al, 2013).

A escassez de normas e guias para a sua aplicação no nosso país foi também uma das razões que incentivou a realização deste trabalho, no qual se contribui para um melhor conhecimentos de SMA, estudando a combinação das suas características com as das MBT, quando se adicionam MBR.

Neste capítulo sintetizam-se os aspetos relevantes relacionados com as tecnologias de produção e execução de MBT e do tipo *Stone Mastic Asphalt*, focando também alguns aspetos da incorporação de MBR.

2.2 A evolução da tecnologia de Misturas Betuminosas Temperadas e da Mistura Stone Mastic Asphalt

2.2.1 Misturas Betuminosas Temperadas

A tecnologia das Misturas Betuminosas Temperadas tem sido estudada e divulgada com maior frequência durante a última década. No entanto, desde os anos 50 que vem despertando a curiosidade da comunidade científica do setor.

Em 1956, o Professor Ladis Csanyi da Universidade do Iowa, começa por desenvolver a tecnologia de betume espuma como ligante de solos (Chowdhury et al, 2008). Através da injeção de vapor de água no betume, Csanyi concluiu que era possível baixar a temperatura da mistura mantendo a sua trabalhabilidade. Desde então, as tecnologias com betume espuma foram sendo desenvolvidas e utilizadas com sucesso um pouco por todo o mundo.

Em 1968, a Mobil Oil Australia adquire a patente de Csanyi e, na tentativa de melhorar o seu processo de fabrico, desenvolve a técnica de betume espuma com injeção de água fria (Kristjánssdóttir et al, 2007).

Durante a década de 70, a Chevron começa por desenvolver estudos sobre a incorporação de emulsões nas misturas betuminosas, no sentido de melhorar a sua estabilidade e, em 1977, publica o “Bituminous Mix Manual”, o qual continha importantes diretrizes sobre o dimensionamento e produção destas misturas. Começa a ser notada a importância das misturas betuminosa a frio, principalmente na pavimentação em zona remotas, onde, tanto a distância à central de produção como o baixo tráfego, retira viabilidade à utilização de misturas convencionais a quente (Kuennen, 2004). Para além disso, este tipo de mistura começa a ganhar notoriedade devido ao fácil transporte das suas centrais, à baixa emissão de poeiras e gases poluentes e à possibilidade de adicionar maior quantidade de material reciclado/recuperado na sua composição (Chowdhury et al, 2008).

Já em 1994, Maccarone (Maccarone et al, 1994) conduz estudos acerca de misturas betuminosas a frio com emulsões e alto teor de betume e conclui que o uso deste tipo de misturas estaria a ganhar aceitação um pouco por todo o mundo. Ele viria a afirmar, inclusive, que “As Misturas a Frio representam o futuro das tecnologias de pavimentação de estradas” (Chowdhury et al, 2008).

A Shell Bitumen, em 1995, criou uma patente de Mistura Betuminosa Temperada produzida com uma técnica de 2 componentes (Harrison et al, 2000). Após os estudos laboratoriais, foram construídos trechos experimentais em vários países, como a Noruega, o Reino Unido e a Dinamarca. Desse trabalho viria a resultar o desenvolvimento do produto WAM-Foam®. Ainda em 1995, as primeiras estradas em MBT foram construídas na Alemanha, com adição do produto Aspha-Min® (Hurley et al, 2008).

Ainda na Alemanha, em 1996, foram impostas regras restritivas à exposição dos trabalhadores a gases resultantes da produção de misturas betuminosas (Martinho, 2014).

No ano seguinte, começa a comercialização, através da empresa Sasol Wax International AG (Sasol, 2004), do aditivo Sasobit®, um aditivo orgânico dos mais comercializados no mundo na atualidade. Este aditivo permite uma melhor trabalhabilidade e compactação da mistura a temperaturas mais baixas que as utilizadas nas misturas a quente, como mais à frente será explicado.

Jenkins (Jenkins et al, 1999) explora um novo processo de aquecimento de agregados abaixo de 100 °C antes da mistura com betume espuma. O pré-aquecimento dos agregados promove uma boa adesividade do betume ao agregado, uma adequada coesão da mistura, assim como resistência à tração e boas condições de compactação. Este processo mostrou-se particularmente importante para misturas com inclusão de material reciclado e para misturas com elevada quantidade de agregados britados (Chowdhury et al, 2008). Um ano depois, em 2000, em França começam a ser apoiados estudos sobre MBT.

Através da evolução das tecnologias de redução de temperatura no fabrico de misturas betuminosas na Europa, começa a surgir o interesse dos Estados Unidos da América em implantar estas tecnologias. Para esse efeito, em 2002, a NAPA (Agência Nacional Americana de Pavimentos) lidera uma visita à Europa com o intuito de recolher informações acerca da implementação destas tecnologias. Desde esse momento, o interesse dos Estados Unidos da

América em MBT tem sido cada vez maior, levando a que a FHWA (Federal Highway Administration) estabelecesse como seu principal foco o desenvolvimento destas tecnologias. Nesse mesmo ano, em França são executados troços experimentais de avaliação de performance.

Em 2004, no “World of Asphalt”, são apresentadas diversas tecnologias e projetos no âmbito do desenvolvimento de MBT (Ferreira, 2009).

Desde 2006, passaram a ser divulgadas internacionalmente pela FHWA, pela AASHTO e pela NCHRP as tecnologias de misturas temperadas. Posteriormente é divulgado, pela NCHRP, o primeiro método de formulação de MBT. Já em 2008 é publicado nos EUA, pelo WMA TWG, um conjunto de especificações técnicas a utilizar em Caderno de Encargos, na construção de autoestradas (Martinho, 2014).

Em 2010, a tecnologia de MBT encontrava-se amplamente divulgada pelo mundo inteiro, sofrendo desenvolvimentos e estudos contínuos. Nos EUA estima-se a aplicação de 50 milhões de toneladas, e no caso da China 3,5 milhões (Sabita, 2011). Na Europa, os países onde as MBT são mais usuais são a Alemanha, a Dinamarca e a Noruega. Neste último caso a evolução da popularidade das MBT é mostrada no gráfico da

Figura 2.1.

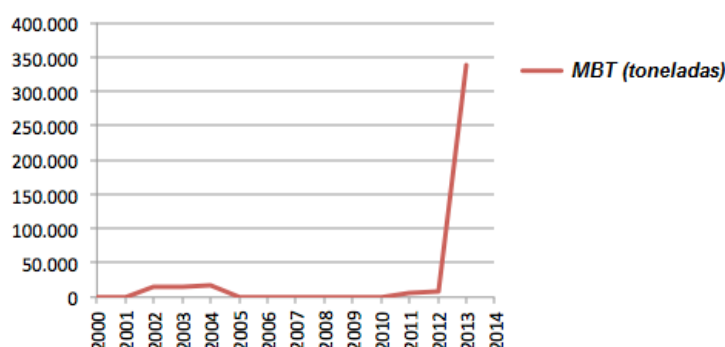


Figura 2.1 Utilização de MBT na Noruega até aos dias de hoje (adaptado de EAPA, 2015)

2.2.2 Stone Mastic Asphalt

A tecnologia de *Stone Mastic Asphalt*, também chamado de *Stone Matrix Asphalt* na América do Norte, ou simplesmente *Splittmastixasphalt* na terminologia alemã original (Prowell et al, 2009), desenvolveu-se nos anos 60 na Alemanha (Brown et al, 1993), a partir da necessidade de responder à agressividade do tráfego, provocada pela intensa utilização de pneus de inverno. Estes eram de comum utilização na Europa do Norte, eram fabricados com pregos na sua superfície, promovendo uma maior aderência à via aquando da presença de neve e gelo (Abreu, 2009).

Durante os anos 70, a utilização das misturas hoje conhecidas como SMA, caiu devido à proibição dos pneus de inverno, por questões ambientais e de integridade dos pavimentos rodoviários (Silva, 2005).

Ainda nos anos 80, esta tecnologia volta a ser recuperada, com o aparecimento de pneus de alta pressão e de parede reforçada utilizados em veículos pesados denominados de *Supersingle*. Estes pneus vieram, em certos casos, substituir os rodados duplos, contribuindo para a procura de estruturas de pavimento com performances à deformação permanente elevadas (Abreu, 2009).

Logo após o aumento da procura da mistura SMA, em 1984, é publicada a primeira norma desta mistura na Alemanha (Shell, 2005).

Em 1990, o interesse nesta mistura chegou aos EUA, e nesse mesmo ano a AASHTO, realizou o “European Study Tour”, numa tentativa de compreender e aproveitar todos conhecimentos sobre SMA na Europa. Nessa altura existiam apenas duas normas em vigor, a Alemã e a Sueca, que influenciaram as primeiras especificações americanas (Prowell et al, 2009).

O conhecimento transferido da Europa para os EUA, levou a que no ano seguinte prosseguissem os trabalhos de construção de trechos experimentais para a avaliação destas misturas. Em 1994, a FHWA e a SMA Technical Working Group (SMA TWG) desenvolvem a primeira especificação técnica para SMA, definindo a granulometria a usar, os valores de referência para o escorrimento de betume e os demais parâmetros assentes na formulação Marshall. Estes trabalhos publicados levaram a que a NCAT desenvolvesse entre 1994 e 1998, a primeira norma americana, NCHRP 9-8 “Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures” (Prowell et al, 2009).

Atualmente, na Europa utiliza-se a norma EN 13108-5 para misturas SMA. No caso de Portugal não existe um anexo nacional próprio, sendo aquela a norma que está em utilização.

A aplicação de SMA é usual em obras rodoviárias mais nobres, como é o caso de pistas de aeroportos, vias com alto de tráfego de pesados, vias com muito tráfego ou com inclinações acentuadas, zonas de descarga dos portos marítimos, paragens de autocarros, rotundas excêntricas e intersecções (Antunes, 2014).

Apesar de, em Portugal, este tipo de misturas não ser de comum aplicação, as SMA ainda são selecionadas para obras de maior importância, especialmente após 2009 (Martinho et al, 2013), no entanto, deseja-se que esta experiência seja mais divulgada no futuro. Entre as obras de maior importância em Portugal, destacam-se a construção do Autódromo Internacional do Algarve, em Portimão, em 2009, e a repavimentação da Avenida do Brasil, em Lisboa, em 2010 (Martinho et al, 2013).

2.3 Tecnologias de produção de Misturas Betuminosas Temperadas e caracterização da composição das misturas do tipo Stone Mastic Asphalt

2.3.1 Tecnologias de produção de Misturas Betuminosas Temperadas

As diferentes tecnologias de produção de misturas betuminosas podem ser classificadas quanto à sua temperatura de fabrico, tal como representado na Figura 2.2. Para além disso, como se pode constatar, quanto maior é a temperatura de fabrico, maior será o *fuel* (energia) consumido e maior será a emissão de gases poluentes para a atmosfera.

As misturas betuminosas temperadas são fabricadas na gama de temperaturas de produção entre 120 e 140°C.

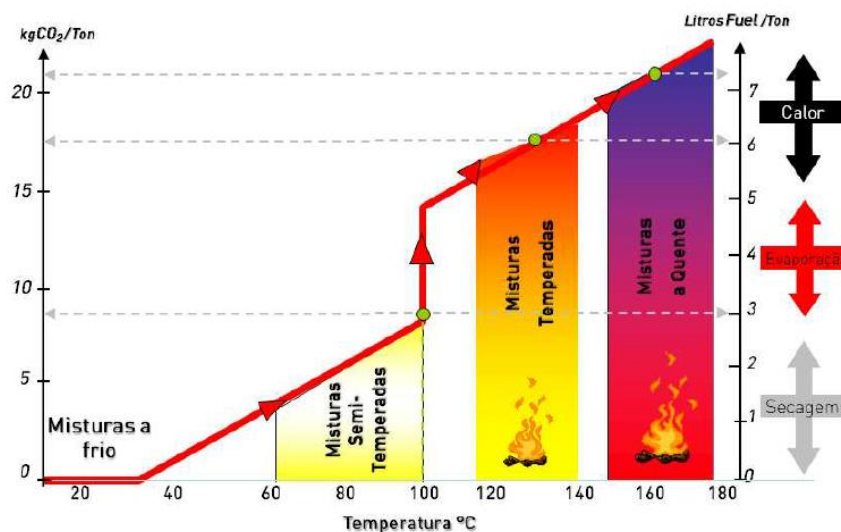


Figura 2.2 Tecnologias de produção de misturas betuminosas classificadas através da temperatura de fabrico (adaptado de FHWA, 2008)

Esta redução de temperatura é conseguida através de vários mecanismos, os quais podem classificar-se em três grupos: aditivos orgânicos que promovem a diminuição da viscosidade do betume, aditivos químicos que melhoram o recobrimento do agregado e tecnologias de espuma de betume.

Os aditivos orgânicos são geralmente encontrados no mercado, sob a forma sólida, em pastilhas ou em granulado, mas também na forma líquida. No processo de fabrico estes são, em geral, previamente misturados no betume, mas também poderão ser adicionados na mistura logo após à adição do ligante. Também existe a possibilidade de adquirir betume previamente aditivado (Martinho, 2014).

Os aditivos orgânicos promovem a redução da viscosidade do ligante, permitindo a redução da temperatura de fabrico e da compactação em cerca de 20 a 30°C (Zaumanis, 2010; D'Angelo et al, 2008). Aqueles aditivos são constituídos por ceras orgânicas que, quando arrefecem, formam uma malha de partículas microscópicas, aumentando a rigidez do betume.

Entre os produtos de aditivos orgânicos mais comuns no mercado, encontra-se o Sasobit®, produzido através de carvão ou gás natural pelo processo *Fisher-Tropsch* e normalmente adicionado ao ligante nas percentagens de 0,8 a 4% da massa de betume (Sasol, 2008).

Os aditivos químicos, ao invés de reduzirem a viscosidade do ligante para melhorar a sua trabalhabilidade, atuam de modo a promover a sua adesividade aos agregados e o recobrimento destes a baixas temperaturas. Existem um conjunto de produtos comercializados, como os tensoativos (*surfactants*), agentes de emulsificação, promotores de recobrimento dos agregados e aditivos antideslocamento (Martinho, 2014).

Existem produtos desta gama que podem ser aplicados com emulsão, como é o caso do Evotherm[®], no qual cerca de 30% da composição do betume é aditivo, conseguindo reduções de temperatura de cerca 65°C no fabrico (Hurley et al, 2005). Os aditivos Rediset[®] WMX ou Cecabase[®] RT são aditivos do tipo tensioativos que promovem a adesividade e o recobrimento dos agregados, sem alterar o desempenho da mistura (Martinho, 2014).

Outra tecnologia de redução da temperatura de produção das misturas betuminosas é a aplicação de emulsões de espuma de betume. Esta é geralmente obtida através da adição de água a frio no betume aquecido, provocando um aumento do seu volume, facilitando o recobrimento dos agregados, reduzindo a viscosidade do betume e promovendo a trabalhabilidade da mistura (Martinho, 2014).

Existem outras técnicas de produção de espuma de betume, como é o exemplo da que se baseia na utilização de aditivos que contêm água, tais como os zeólitos.

Os zeólitos são minerais (silicato de alumínio hidratado cristalino), comercializados em forma de pó, que podem conter cerca de 20% de água na sua composição (Martinho, 2014). Estes agentes quando adicionados ao betume aquecido libertam a água, na forma de vapor, formando espuma de betume. Normalmente o volume criado por esta libertação de água não é tão grande como nas técnicas de produção de espuma à base de água, podendo ser necessário recorrer aditivos estabilizadores (Prowell et al, 2011).

Nas diferentes tecnologias de redução de temperatura através de espuma de betume à base de água, destaca-se a técnica LEA (Low Energy Asphalt) e o WMA-Foam[®] (Capitão et al, 2012).

A tecnologia LEA é constituída por várias etapas. Na primeira, parte do conjunto de agregados é aquecido a um nível de temperatura semelhante ao habitualmente usado nas misturas a quente e misturado com betume quente. Na segunda, é adicionada a parte restante dos agregados húmidos, formando, assim, espuma de betume a partir da libertação de vapor que resulta do contacto dos agregados húmidos com os restantes constituintes aquecidos. Na terceira, adicionam-se aditivos de promoção de adesividade e de redução de viscosidade, podendo assim baixar-se a temperatura de fabrico até 95°C. Esta técnica tem algumas variantes, podendo identificar-se 3 processos. As diferenças entre eles residem na adição ou não de água ao processo e na ordem de introdução dos constituintes na misturadora. A capacidade de reduzir a energia consumida no processo de aquecimento dos agregados, e a adição usual de misturas betuminosas recuperadas (MBR) nesta tecnologia são algumas das suas mais-valias (Martinho, 2014, Ferreira, 2009).

A tecnologia WMA-Foam[®] é um processo de mistura contínua que é dividido em duas fases. A primeira fase corresponde à introdução de um betume de baixa viscosidade na misturadora, envolvendo todos os agregados previamente aquecidos. Na segunda fase é injetada uma espuma de betume à base de água fabricada a partir de um betume duro. Os critérios de seleção destes dois tipos de betume têm de ser cuidadosamente estudados, de forma a conseguir as características finais pretendidas. Deste processo resulta uma mistura betuminosa de boa trabalhabilidade, com temperaturas entre 100 e 130°C, e passível de ser aplicada entre 70 e 110°C (Capitão et al, 2012).

Existem também no mercado, outros tipos de aditivos, como é o caso do VIATOP[®] CT40. Este é um aditivo composto por uma parcela de ceras *Fisher-Tropsch* (Sasobit[®]) e outra parcela de fibras celulósicas. Este tipo de aditivos torna-se útil quando se pretende, para além da diminuição da viscosidade e temperatura de fabrico e compactação, prevenir o escorrimento de betume. Este fenómeno ocorre em misturas de granulometria descontínua com altas percentagens de betume, como é o caso das misturas do tipo SMA, objeto de estudo neste trabalho.

2.3.2 Composição da mistura Stone Mastic Asphalt

De acordo com a norma EN 13108-5, poderá definir-se uma SMA como sendo, uma “mistura de granulometria descontínua com ligante betuminoso, composta por um esqueleto pétreo de agregado grosso ligado por um mástique”. Já o SMA Technical Working Group (SMA TWG) e a FHWA, define o SMA como sendo, uma “mistura a quente de agregado de granulometria descontínua e betume que maximiza as frações de betume e agregado grosso. Este último fornece um estável esqueleto pétreo que é mantido unido por uma mistura de fíler, aditivo estabilizante e uma elevada percentagem de betume” (Abreu, 2009).

Entre as especificidades da mistura do tipo SMA, a que mais se salienta é a sua granulometria, cujos limites estabelecidos pela norma EN 13108-5 estão reproduzidos na Figura 2.3. Pretende-se que esta mistura seja resistente às deformações permanentes e, para isso, estabelece-se uma granulometria descontínua, de modo a que todos os agregados grossos permaneçam em contato entre si, e haja transferências de tensão entre eles e não através do mástique, conforme se representa na Figura 2.3. Por este fenómeno, também é importante a escolha de agregados de boa qualidade, para garantir esta distribuição de esforços eficaz.

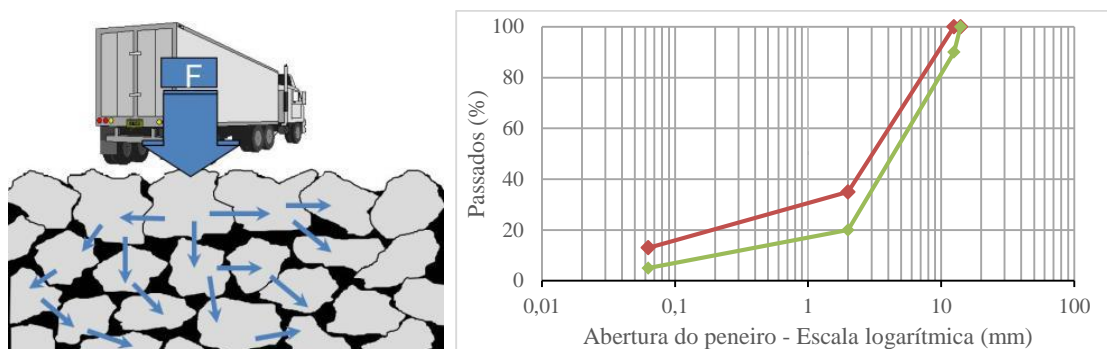


Figura 2.3 Esquema representativo da transferência de tensões entre os agregados (à esquerda) (Martinho et al, 2013) e limites à curva granulométrica, impostos pela norma EN 13108-5 (à direita)

Por esta ser uma mistura de granulometria descontínua, mas com porosidades não muito elevadas, a rondar 3 a 4%, é necessário bastante betume, para que este una os agregados entre si. Normalmente para estas misturas as percentagens de betume rondam os 6 a 6,5% (Abreu, 2009).

As altas percentagens de betume acarretam problemas no transporte e na aplicação, podendo ocorrer o fenómeno de escorrimento do betume para a base da mistura no transporte, e o aparecimento de manchas de exsudação, também designado por *fat spots*, após a aplicação do pavimento.

Decorrente da necessidade de combater o fenómeno de escorrimento, ou *draindown* na literatura anglo-saxónica, esquematicamente representado na Figura 2.4, começaram a ser desenvolvidas fibras estabilizadoras de betume.

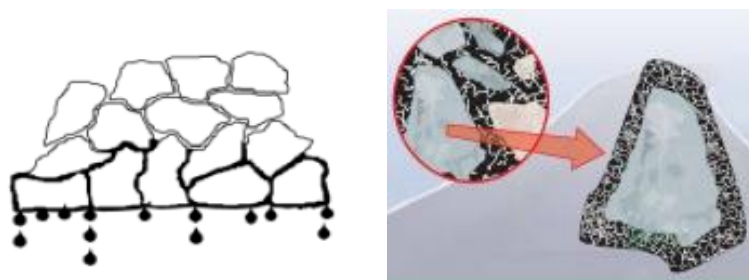


Figura 2.4 Esquema representativo do fenómeno de escorrimento do betume (à esquerda) e esquema de representativo da ação das fibras estabilizadoras no betume (à direita) (Martinho et al, 2013)

Estas fibras podem ser de origem inorgânica ou orgânica, sendo exemplos das inorgânicas, a lã de rocha, fibras de poliéster ou fibras de vidro, e das orgânicas, a lã natural ou as fibras celulósicas, largamente utilizadas e obtidas de fontes renováveis, como por exemplo, cascas de árvore. Normalmente a percentagem de adição das fibras inorgânicas é um pouco maior do que as fibras orgânicas, podendo variar entre 0,3 e 0,9% (Batista et al, 2012; Abreu, 2009).

Assim, em sentido lato, uma mistura SMA, pode ser definida, como uma mistura de alta resistência à deformação permanente a temperaturas elevadas, por via do seu esqueleto pétreo resistente de agregados grossos, bem imbricados, aglutinados por um mástique, constituído por uma alta percentagem de betume, com fibras estabilizadoras, fíler e agregados finos. Um esquema representativo de uma mistura SMA e uma fotografia da mistura compactada em serviço podem ser vistos na Figura 2.5.

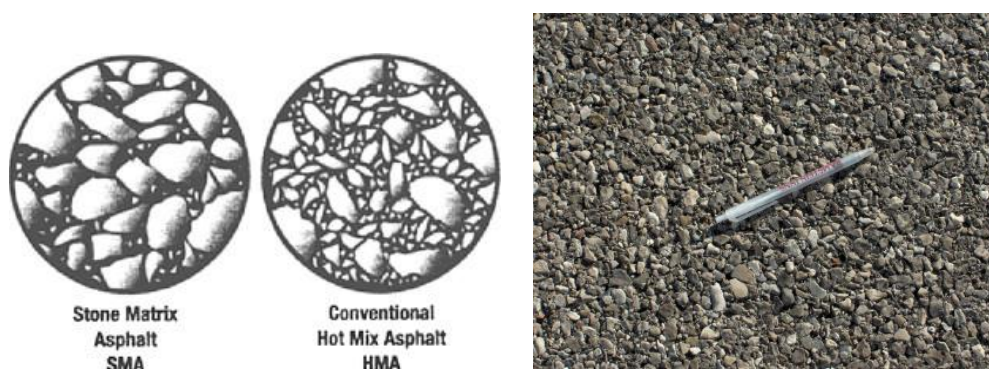


Figura 2.5 Representação do aspeto interno de uma mistura SMA em contraponto com as misturas tradicionais (à esquerda) (Highway1, 2016), e macro textura superficial de um SMA aplicado em obra (à direita) (Prowell et al, 2009).

2.4 Vantagens e desvantagens da utilização de Misturas Betuminosas Temperadas

A literatura habitualmente classifica os vários benefícios/vantagens decorrentes da utilização de MBT em 4 grupos distintos, designadamente: vantagens técnicas, vantagens económicas, vantagens ambientais e vantagens na ótica dos trabalhadores e meio envolvente.

2.4.1 Vantagens técnicas

Do ponto de vista técnico, destaca-se a maior flexibilidade na aplicação e no transporte das MBT, as quais, por manterem a sua trabalhabilidade durante mais tempo, poderão ser aplicadas com menores exigências durante a estação fria do ano, sendo essa uma vantagem importante em relação às misturas a quente. Por estas razões, também o transporte desde a central de produção até ao local de obra poderá ser alongado, trazendo vantagens do ponto de vista da logística das obras. A possibilidade de aplicação de MBT durante o período noturno também poderá ser vantajoso, quando se pretende reduzir os prazos de execução, ou no caso do fator tráfego rodoviário diurno ser restritivo à realização dos trabalhos (Martinho, 2014).

As misturas do tipo MBT conduzem a um menor endurecimento do betume, devido a uma oxidação menos acentuada durante o fabrico, uma vez que este se faz a temperaturas mais baixas. Betume menos endurecido conduz a uma compactação mais fácil e, por conseguinte, a menores porosidades. Alguns autores defendem, também, que o comportamento à deformação permanente é melhorado, particularmente quando se utilizam ceras orgânicas como aditivo (Zaumanis, 2010, D'Angelo et al, 2008).

Quando se utilizam betumes duros, em clima frio, ou se produzem misturas com MBR, ou ainda Misturas de Alto Módulo (MAM), as MBT têm uma melhor trabalhabilidade que as homólogas produzidas a quente, verificando-se que a redução de temperatura ao longo do tempo de realização dos trabalhos não é tão restritiva.

Comparativamente às misturas a frio (MBF), as MBT apresentam a vantagem de não necessitarem de tempo de cura após a aplicação e não necessitarem de selante superficial antes da entrada ao serviço (Martinho, 2014). As MBT também permitem um melhor espalhamento e compactação das camadas (Button et al, 2007).

2.4.2 Vantagens económicas

Devido à recente escalada dos preços do petróleo bruto, cada vez interessa mais uma utilização racional de combustíveis na produção industrial.

A redução de temperatura na produção conduz consequentemente a uma redução no consumo de energia/combustível utilizada(o). De facto, o consumo de energia pode ser otimizado até 35%, dependendo do quanto a temperatura é reduzida, das condições da central, do teor de água e da temperatura dos agregados. É conhecido que o consumo de energia aumenta com o aumento da temperatura de fabrico e do teor de água dos agregados (Martinho, 2014).

Outro aspeto a salientar é a propensão das MBT para acolherem a adição de MBR. O facto de a viscosidade do betume ser baixa (nos casos em que a técnica utilizadas leva a isso), possibilita uma boa envolvimento e aderência dos agregados reciclados ao ligante, e uma compactação satisfatória (Martinho, 2014). A utilização de material recuperado da fresagem de pavimento contribui para a economia de agregados virgens, poupança em transporte e em volume de vazadouro, além de ser uma prática ambientalmente mais sustentável que as tradicionais.

2.4.3 Vantagens ambientais

A principal consequência da redução de temperatura de produção nas MBT é o seu menor impacto ambiental. Como foi referido, aquela diminuição de temperatura conduz a um menor gasto de energia, assim como a uma redução das emissões de gases poluentes e poeiras para a atmosfera. Os dados relativos à redução de emissões de gases poluentes tem sido documentados na Europa (D'Angelo, et al, 2008; Jullien et al, 2011) e nos EUA (Button et al, 2007).

Segundo a EAPA (EAPA, 2010) e D'Angelo (D'Angelo, et al, 2008), foram observadas reduções nas emissões de gases poluentes durante a produção de misturas betuminosas temperadas, de 30 a 40% de dióxido de carbono (CO₂) e enxofre (SO₂), até 50% nos compostos orgânicos voláteis (COV), 10 a 30% no monóxido de carbono (CO), 60 a 70% nos óxidos de azoto (NO₂) e 25 a 55% nas poeiras. No Quadro 2.1 estão resumidas estas reduções de acordo observadas em vários países.

Quadro 2.1 Dados relativos à redução de emissões com Misturas Betuminosas Temperadas, em percentagem [adaptado de (FHWA, 2008)]

Emissões	Noruega	Itália	Holanda	França
CO ₂	31,5	30-40	15-30	23
SO ₂	ND	35	ND	18
COVs	ND	50	ND	19
CO	28,5	10-30	ND	ND
NO _x	61,5	60-70	ND	18*
Poeiras	54	25-55	ND	ND

*Como NO₂

ND – não determinado

No que concerne à inclusão de MBR nas misturas, conforme já referido anteriormente, esta pode ser benéfica do ponto de vista ambiental, pois reaproveita de melhor forma resíduos que poderiam não ser tão bem empregues nas misturas a quente, pois a inclusão de aditivos para baixar a viscosidade beneficia o envelhecimento do betume que vem incorporado no material reciclado (Martinho, 2014).

2.4.4 Vantagens para trabalhadores e envolvente de trabalho

A redução de temperatura de produção das MBT até 40°C relativamente às misturas a quente permite que haja um maior conforto para os trabalhadores, tanto em produção como na execução. Como foi referido no subcapítulo anterior, aqueles terão uma menor exposição a gases poluentes e, o facto de a temperatura ser menor, poderá conduzir a uma maior produtividade na execução.

Através da observação de ensaios de monitorização da libertação de componentes voláteis do betume e de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PHA), pode-se afirmar que existe uma redução drástica relativamente às misturas a quente, na ordem dos 30 a 50% (Capitão et al, 2012).

Estes aspetos não são só importantes para quem trabalha diretamente na indústria, mas também para populações na envolvente, quer na zona de fabrico quer na zona de obra. De salientar a possibilidade das distâncias de transporte das MBT serem mais longas, o que permite colocar as centrais de produção em locais mais afastados dos aglomerados populacionais.

2.4.5 Desvantagens na utilização de Misturas Betuminosas Temperadas

A utilização de MBT está sujeita a uma série de obstáculos e desvantagens que se apresentam sinteticamente a seguir.

Talvez o maior inconveniente das MBT seja o facto do investimento inicial ser mais elevado, apesar de todas as suas vantagens económicas. A aquisição de aditivos será só parcialmente compensada pela poupança de energia e combustíveis consumidos, através das suas baixas temperaturas de produção (Button, et al, 2007; D'Angelo et al, 2008). A compra de aditivos tem bastante peso no custo inicial, assim como a necessidade de adaptações na central de produção para algumas das tecnologias, particularmente para as que se baseiam na produção de espuma de betume. Além disto, as emissões de dióxido de carbono na produção dos aditivos terão de ser adicionadas às emissões decorrentes do fabrico da mistura por si só, o que irá aproximar das emissões geradas na produção de misturas a quente.

Existem também desvantagens técnicas. Em alguns casos, estas misturas poderão sofrer maior suscetibilidade a deformações permanentes, embora com melhor durabilidade, devido à sua boa trabalhabilidade, que conduz a uma boa compactação e, por conseguinte, a uma porosidade adequada, aliada a um menor endurecimento do betume causada pela sua menor oxidação a temperaturas mais baixas (Martinho, 2014).

Outro aspeto importante é a necessidade de prestar especial atenção na garantia da homogeneidade e dispersão dos aditivos na mistura ou no ligante, visto que as dosagens são relativamente baixas, na ordem de 0,3 a 0,6% da massa de betume.

2.5 Vantagens e desvantagens da utilização de Misturas do tipo Stone Mastic Asphalt

Talvez a vantagem mais importante de uma mistura SMA seja a sua resistência à deformação permanente. Este tipo de mistura tem uma forte estrutura pétreia, com um bom imbricamento entre as partículas grossas, e a maior parte das vezes é aplicada em vias fortemente solicitadas por tráfego pesado e em aeroportos. O facto deste tipo de misturas conter uma percentagem de betume relativamente elevada faz com que o seu módulo de rigidez e o seu comportamento à fadiga e a sua resistência ao fendilhamento térmico, nomeadamente a baixas temperaturas, seja bastante bom (Blazejowski, 2011; Martinho et al, 2013).

Outra das suas características diferenciadoras é a porosidade reduzida, tendo em conta que se trata de uma mistura de granulometria descontínua, o que geralmente contribui para uma boa resistência ao envelhecimento. Também a adesividade entre o ligante e o agregado neste tipo de misturas é alta, devido à alta percentagem de betume, à presença de fibras estabilizadoras e à maior quantidade de fíler (Blazejowski, 2011).

Após a aplicação em obra, as misturas do tipo SMA apresentam boas características de macrotextura superficial, a qual pode ser observada na Figura 2.5 anteriormente apresentada. A macrotextura permite uma boa resistência à derrapagem, um nível razoável de ruído na passagem do tráfego e uma diminuição do *spray* projetado pelos pneus em situações de piso molhado (Nunn, 1994).

A nível de custos de manutenção e a longo prazo, devido à boa durabilidade e comportamento mecânico, é razoável afirmar que a vida útil do pavimento é 30 a 40% mais longa que um pavimento de uma mistura tradicional, sendo assim o seu custo anual de manutenção menor (Vargas-Nordbeck, 2007). Este aspeto permite ainda uma diminuição da procura de matérias-primas, contribuindo assim, para uma utilização mais responsável dos recursos ambientais.

As desvantagens são sobretudo relativas aos custos iniciais e aos cuidados adicionais necessários na aplicação em obra.

Entre os fatores que influenciam o elevado custo inicial das SMA estão a elevada percentagem de betume, um aumento de aproximadamente 10% na quantidade de fíler, a adição de fibras estabilizadoras, a seleção de agregados de boa qualidade e a temperatura de fabrico mais alta (Blazejowski, 2011). O custo inicial elevado leva a que a seleção de obras com SMA se restrinja a obras de maior importância, como vias fortemente solicitadas por tráfego pesado, portos ou aeroportos.

A aplicação de SMA em obra requer cuidados adicionais que poderão ser vistos como uma desvantagem. Relativamente às misturas tradicionais as SMA apresentam fraca resistência à derrapagem inicial, originada por uma película espessa de betume na superfície que, por vezes, pode requerer a aplicação de areia, o denominado *gritting*, o cuidado adicional no transporte devido ao fenómeno de escorrimento do betume e o aparecimento de patologias após a aplicação, como a exsudação de betume à superfície, normalmente denominada por *fat spots*, na literatura anglo-saxónica (Blazejowski, 2011).

2.6 Considerações sobre a Incorporação de Material Betuminoso Reciclado (MBR) em Misturas Betuminosas Temperadas (MBT)

Após avaliar as tecnologias para o fabrico de MBT, importa apresentar breves considerações sobre a inclusão de MBR naquele tipo de misturas, particularmente porque o presente trabalho contribui para o estudo desse tipo de soluções.

As MBR trazem bastantes benefícios económicos, ambientais e de sustentabilidade, tal com a produção de misturas a temperaturas mais baixas. Segundo o estudo de Nynas (Nynas, 2009), a incorporação de 14% de MBR em MBT levou a uma diminuição das emissões de carbono de cerca de 4%. De facto, a conjugação de MBT com a utilização de MBR pode potenciar ainda mais os benefícios que cada uma das tecnologias traz. Por isso, importa estudar também de que forma esta incorporação resulta ao nível do desempenho mecânico destas misturas.

As misturas betuminosas recuperadas (MBR) podem ser encontradas na literatura com diversas designações. Em Portugal, é usual designarem-se também como misturas betuminosas recicladas, material fresado (MF), fresado(s), ou resíduos de mistura betuminosa. Na terminologia anglo-saxónica é usual o termo *Reclaimed Asphalt* (RA) ou *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) (Antunes, 2014).

Ao longo dos últimos anos, devido às suas potencialidades, a incorporação de MBR em misturas betuminosas tem sido alvo de vários estudos. Além dos benefícios económicos e de sustentabilidade intrínsecos genericamente reconhecidos às MBT, a nível da performance é exigível que as MBT com incorporação de MBR permitam um nível de resistência semelhante, ou mesmo superior, a uma mistura sem incorporação de MBR.

Rashwan (Rashwan, 2012) refere no seu estudo que devido ao sucesso da incorporação de percentagens altas de MBR, se deveria estudar mais profundamente incorporações acima de 30%. Casos de incorporação de MBR acima dos 35% em MBT começam a ser comuns e a apresentar bons resultados (Solaimanian et al, 2011).

Shu (Shu et al, 2012) afirma que quanto maior é percentagem de MBR incorporada numa MBT com betume espuma, maior é a sua resistência à humidade, contribuindo para a sua durabilidade.

Também já foi demonstrado que o betume envelhecido presente nas MBR pode ser rejuvenescido pelo betume novo, contribuindo para a melhoria da resistência ao fendilhamento por fadiga da mistura betuminosa resultante (Ruhl et al, 2006).

Martinho (Martinho, 2014) verificou que o desempenho de MBT, do tipo AC 20 base, com 35% de MBR conduziram a resistências mecânicas satisfatórias, embora ligeiramente inferiores à mistura a quente de referência. Além disso, concluiu que o controlo da granulometria dos constituintes agregados quando se incorpora MBR deve ser mais apertada, no sentido de evitar heterogeneidades no processo de produção.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES E FORMULAÇÃO DA MISTURA

3.1 Enquadramento

O estudo experimental que serviu de base ao presente documento foi realizado com o objetivo de contribuir para o conhecimento do comportamento mecânico de misturas do tipo SMA temperadas, com incorporação de MBR. O estudo destes materiais foi iniciado por Antunes (Antunes, 2014), designadamente no que refere à formulação e à caracterização dos constituintes das misturas que se apresentam neste capítulo.

Neste capítulo descreve-se a formulação da mistura betuminosa estudada, através do método empírico de formulação *Marshall*. Escolheu-se este método por este ser o mais utilizado em Portugal em formulação de misturas betuminosas.

Este método, tal como se descreve neste capítulo, pressupõe a escolha e a caracterização dos materiais constituintes, a avaliação das propriedades volumétricas da mistura através do estabelecimento da composição base e ensaio mecânico no estabilómetro *Marshall*, de modo a obter a fórmula para a composição final da mistura. Adicionalmente foi efetuado o ensaio de *Schellenberg*, para a avaliação do nível de escorrimento do betume, que se torna necessário para as misturas do tipo SMA, por serem misturas com granulometria descontínua.

Deste modo, foi escolhida uma mistura do tipo SMA 12,5. Esta mistura é semelhante à estudada no trabalho elaborado por Gardete (Gardete, 2016), mas com a particularidade de ser temperada e conter cerca de 20% de MBR, dividido em duas frações, uma de material grosso e outra de material fino.

3.2 Materiais constituintes

3.2.1 Seleção de agregados e análise granulométrica

Para misturas do tipo SMA a seleção de agregados a utilizar é muito importante, tanto no que refere à sua qualidade como no que diz respeito à sua granulometria. De facto, só assim pode conseguir-se uma estrutura pétreia robusta e um bom imbricamento das partículas grossas dos agregados, de modo a conferir uma boa resistência à mistura, nomeadamente à deformação permanente.

Desta forma optou-se por seleccionar agregados naturais britados de rocha granítica por estes apresentarem bom comportamento ao esmagamento. Foram seleccionadas 3 frações

granulométricas, uma brita de dimensões 4/12,5 mm, um pó de dimensões 0/4 mm e um fíler calcário.

A aferição da conformidade dos agregados britados novos passa pela comparação dos valores de certas propriedades físicas e geométricas patentes nas fichas técnicas dos produtos com os limites ou recomendações da Norma NP EN 13043. Nos Quadro 3.1, Quadro 3.2 e Quadro 3.3 estão resumidas a propriedades mais importantes, geralmente consideradas, para a seleção de agregados britados novos para misturas a quente a aplicar em camadas de desgaste. Uma vez que a mistura MBT em estudo se destina a ser utilizada para o mesmo fim, consideram-se os mesmos parâmetros de avaliação.

Quadro 3.1 Propriedades dos agregados de granulometria 4/12,5 mm

Propriedade	Massa Volúmica (Mg/m³)			Granulometria	FI (%)	SI (%)	LA (%)	M _{DE} (%)	Baridade, ρ _b (Mg/m³)	WA (%)	PSV (%)
	pa	prd	pssd								
Material											
Brita 4/12,5	2,65	2,60	2,62	G _C 90/15	FI ₁₅	SI ₂₀	LA ₂₀	M _{DE} 10	1,38	0,7	PSV ₅₆
NP EN 13043											
Requisitos/ Categoria	A declarar			A declarar	FI ₂₀	ND	LA ₂₀ *	M _{DE} 15	A declarar	≤1	PSV ₅₀

*Para rochas granitoides LA30

Através da análise do Quadro 3.1 conclui-se que os valores de FI (índice de achatamento), LA (índice de fragmentação), M_{DE} (coeficiente de *Micro-Deval*), WA (absorção de água) e PSV (coeficiente de polimento acelerado), cumprem as respetivas categorias indicadas na NP EN 13043.

Quadro 3.2 Propriedades dos agregados de granulometria 0/4 mm

Propriedade	Massa Volúmica (Mg/m³)			Granulometria	MB _F (g/kg)	Baridade, ρ _b (Mg/m³)	WA (%)
	ρ _a	ρ _{rd}	ρ _{ssd}				
Material							
Pó 0/4	2,65	2,62	2,63	G _A 80	MB _F 10	1,61	0,4
NP EN 13043							
Requisitos/ Categoria	A declarar			A declarar	MB _F 10	A declarar	≤1

Para materiais finos é conveniente ter atenção à possível contaminação presente. Esse valor é avaliado através do ensaio de azul-metileno. A norma NP EN 13043 estabelece a categoria de valor de azul-metileno de MB_F10, pelo que a fração 0/4 cumpre o requisito.

Também para o fíler a mesma norma exige o cumprimento de certos requisitos. A análise do Quadro 3.3 permite afirmar que o fíler usado também cumpre os requisitos da norma.

Quadro 3.3 Propriedades do fíler

Propriedade	Massa Volúmica (Mg/m ³)	Vazios de fíler seco compactado - <i>Ridgen</i> (%)	Baridade, pb (Mg/m ³)
Material			
Fíler	2,7	32	0,9
NP EN 13043			
Requisitos/Categoria	≤ 0,2 Mg/m ³ do valor declarado	v 28/38	Entre 0,5 e 0,9 Mg/m ³ do valor declarado

O material reciclado incluído nesta mistura foi obtido por fresagem de uma camada superficial de um trecho da autoestrada A13, fornecido pela empresa Contec[®].

Primeiramente, foi elaborada uma análise granulométrica deste material (Antunes, 2014), com limitação da dimensão máxima das partículas a 16mm, e separação em várias frações com recurso a peneiração manual e automática. Dessas frações foram selecionadas 2 frações, uma de material mais grosseiro, 8/16 e outra de material fino, 0/8, com uma percentagem de betume envelhecido de 6,3 e 4,6%, respetivamente. Estes valores foram obtidos através do método de inceneração em mufla, de acordo com a norma EN 12697-39. Fixou-se uma percentagem de material reciclado a adicionar à mistura de 20% do volume de agregados total.

A primeira aproximação a uma granulometria para a formulação da mistura foi baseada nos limites impostos pela norma EN 13108-5, para uma mistura do tipo *Stone Mastic Asphalt* 12,5. Os limites de fuso impostos estão destacados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 Limites do fuso granulométrico para misturas *Stone Mastic Asphalt* (adaptado de EN 13108-5: 2006)

D	4	6 (6,3)	8	10	12 (12,5)	14	16	20
Peneiro (mm)	Passados no Peneiro % Em massa total							
1,4 D ^a	100	100	100	100	100	100	100	100
D	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100
2	25 a 45	20 a 40	20 a 40	20 a 35	20 a 35	15 a 30	15 a 30	15 a 30
0,063	5 a 14	5 a 14	5 a 14	5 a 13	5 a 13	5 a 12	5 a 12	5 a 12

A partir da percentagem de passados nos peneiros indicados no Quadro 3.4, foi possível marcar os pontos limite e traçar uma envolvente, a qual se encontra representada na Figura 3.1. Note-se que a norma não estabelece um fuso granulométrico, mas apenas pontos de controlo.

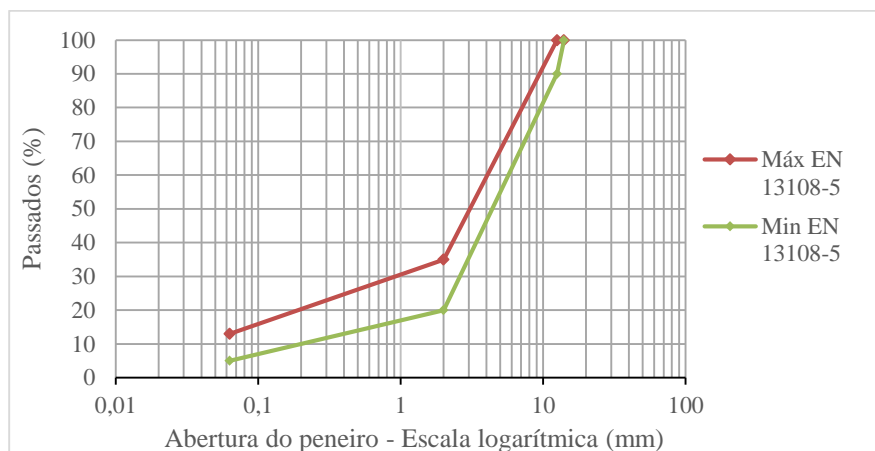


Figura 3.1 Limites de fuso granulométrico de acordo com a norma EN 13108-5 para SMA12,5

Tendo em conta as indicações de um trabalho anterior (Gardete, 2016), foi seguida uma aproximação à granulometria usada nesse estudo para uma mistura SMA12,5, mas sem MBR, pelo que algumas diferenças estão diretamente relacionadas com este facto. Deste modo estabeleceu-se a granulometria a utilizar, demonstrada no Quadro 3.5 e na Figura 3.2.

Quadro 3.5 Análise granulométrica dos agregados usados na formulação da mistura

Percentagem acumulada do material que passa (%)											
Peneiro	16	14	12,5	10	8	6,3	4	2	0,5	0,125	0,063
MBR 8/16	100,0	100,0	90,6	51,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MBR 0/8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	92,7	83,1	66,1	32,8	15,4	7,2
Brita 4/12,5	100,0	100,0	98,5	78,0	36,9	14,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0
Pó 0/4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	86,7	51,9	23,3	14,0
Fíler	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	93,7	72,1

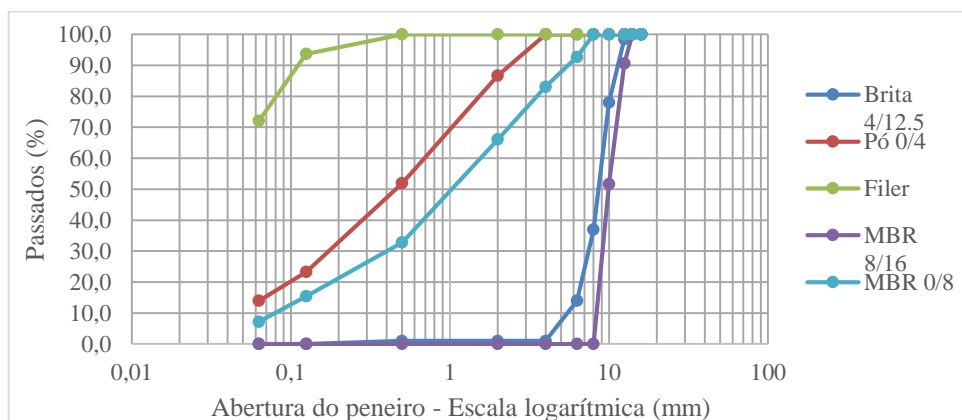


Figura 3.2 Granulometria das várias frações granulométricas

Conhecidas as curvas granulométricas dos vários agregados constituintes, procedeu-se ao estabelecimento das diferentes quantidades de frações a utilizar, conforme representado no Quadro 3.6. Através de uma folha de cálculo foram ajustadas as várias percentagens das frações de modo a produzir uma curva granulométrica o mais em conformidade possível com os limites estabelecidos.

De notar que a quantidade de MBR é 20% da massa total de agregados, do qual 12 % pertence à fração mais grossa e 8% à fração mais fina. Esta divisão foi necessária para possibilitar o estabelecimento de uma curva descontínua incorporando MBR de granulometria marcadamente contínua. Por se tratar de uma mistura do tipo SMA, a fração de agregado grosso deve ser bastante elevada para garantir o esqueleto pétreo necessário.

Quadro 3.6 Percentagem das frações de agregados

Tipo de agregado	Percentagem do volume total de agregados (%)
MBR 8/16	12
MBR 0/8	8
Brita 4/12,5	62
Pó 0/4	10
Fíler	8

Na Figura 3.3 procede-se à comparação da curva da mistura em estudo, e também da estabelecida por Gardete (Gardete, 2016), com os limites estabelecidos na Norma Europeia aplicável. Verifica-se que a granulometria em estudo cumpre os pontos limite da norma EN 13108-5. Estes limites por considerarem apenas 4 pontos de controlo, para as dimensões de 20, 14, 2 e 0,063 mm, não permitem uma boa definição de um fuso. De facto, o traçado da envolvente construída com base nos pontos de controlo pressupõe que o fuso granulométrico da mistura em estudo está fora dos limites especificados, o que não acontece. Além disso, a envolvente dos limites da norma tem o seu ponto de quebra no peneiro 2 mm e a curva da mistura em estudo apresenta o seu ponto de quebra no peneiro de 4mm.

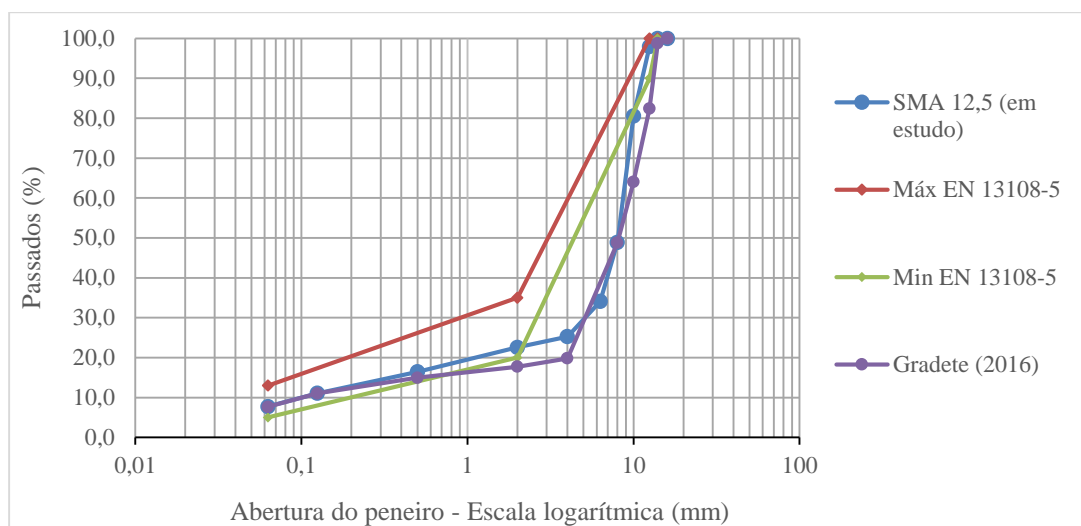


Figura 3.3 Comparação entre curvas granulométricas para SMA 12,5

De forma a analisar melhor a curva granulométrica obtida, já que a Norma Europeia não parece ser totalmente conclusiva, procedeu-se à sua comparação com outras especificações, conforme está representado na Figura 3.4, na qual se compara a curva em estudo com as propostas espanhola para SMA 11 e do projeto NCHRP 9-8 (Prowell et al., 2009) para SMA 12,5.

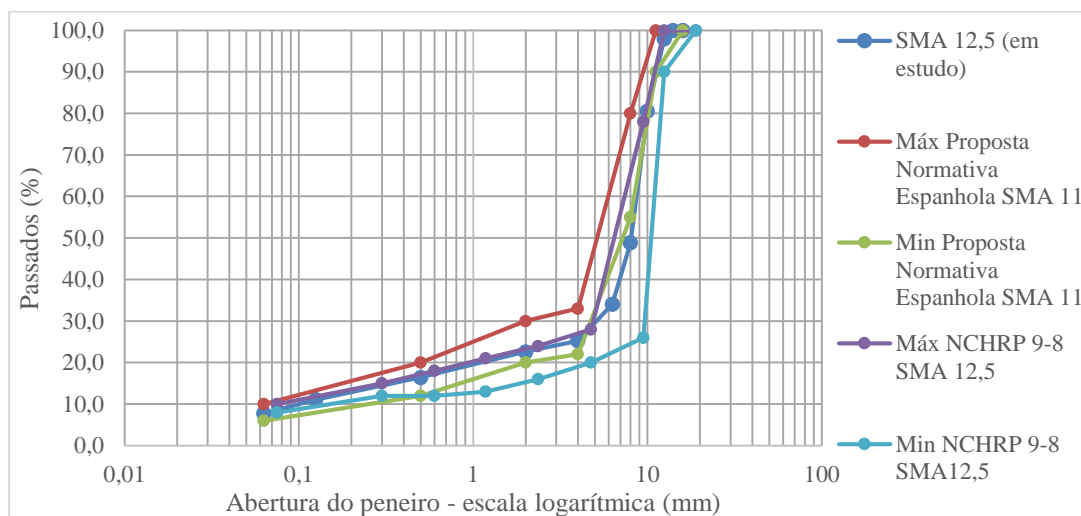


Figura 3.4 Comparação entre a curva granulométrica da mistura com propostas normativas estrangeiras

Da análise dos diversos fusos apresentados, conclui-se que a curva granulométrica da mistura em estudo cumpre os pontos de controlo da EN 13108-5. Em relação à proposta espanhola, a quebra no fuso granulométrico dá-se no peneiro de 4mm, tal como a granulometria proposta. já no projeto NCHRP 9-8, a quebra dá-se no peneiro 9,5mm, pelo que aí se admite uma granulometria ainda mais descontínua que a proposta para esta mistura.

3.2.2 Ligante

O tipo de ligante usado foi um betume do tipo 35/50, amplamente usado em Portugal e fornecido pela empresa Repsol®, em conformidade com a norma EN 12591. O Quadro 3.7 resume as propriedades constantes na ficha de produto com as propriedades exigidas pela norma.

Quadro 3.7 Conformidade das propriedades do betume 35/50

Propriedades	Betume 35/50 Repsol®	EN 12591
Penetração (mm) [25°C; 100g; 5s]	41	35-50
Temperatura de amolecimento (°C)	55,4	50-58
Viscosidade cinemática (mm²/s) [135°C]	686	≥ 370

3.2.3 Aditivos e fibras

Conforme o já apresentado anteriormente no Capítulo 2, as MBT podem ser produzidas com a adição de aditivos para ser possível baixar as temperaturas de trabalho. Tratando-se de uma MBT do tipo SMA é também necessário adicionar fibras celulósicas para evitar o escorrimento do betume.

Para atender às preocupações referidas, utilizou-se a adição *VIATOP® plus CT 40*, com a sua composição representada da Figura 3.5. Este produto é composto por cerca de 60% de fibras celulósicas com betume, para prevenção do escorrimento, e 40% de cera sintética do tipo *Fischer-Tropsch* (F-T), neste caso da marca Sasobit®, de forma a melhorar a trabalhabilidade e compactação da mistura a baixas temperaturas.

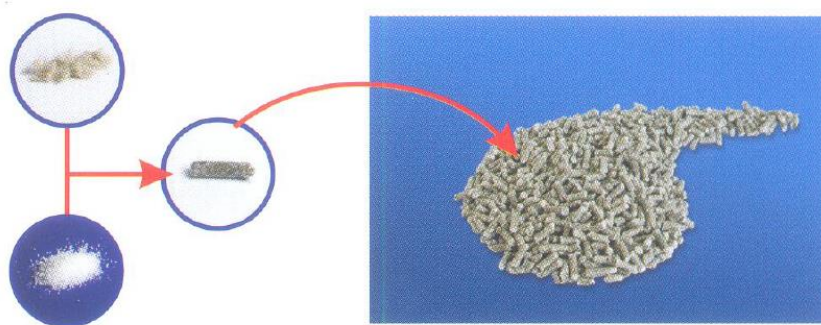


Figura 3.5 Composição do produto *VIATOP® plus CT 40* (adaptado de JRS, 2015)

A dosagem de *VIATOP® plus CT 40* usada em relação à massa total de betume foi de 6 %, o que corresponde a cerca de 3,6 % de fibras celulósicas com betume e 2,4% de cera sintética Sasobit®. Em relação à massa total, a percentagem de adição foi aproximadamente 0,3%. A dose recomendada pelo fabricante é de 0,5% da massa total (JRS, 2015), enquanto que a

AASHTO M 325-8 (AASHTO, 2008) recomenda uma dosagem mínima de 0,3% da massa total.

3.3 Formulação da mistura betuminosa – Formulação Marshall

3.3.1 Considerações iniciais

Após a seleção dos agregados constituintes e o estabelecimento da curva granulométrica da mistura, bem como a seleção do ligante e dos aditivos a utilizar tem de proceder-se à formulação da mistura em laboratório (determinação da percentagem ótima de betume).

Neste caso, escolheu-se o método de Marshall de natureza empírica, por ser o método mais utilizado em Portugal na formulação de misturas betuminosas, apesar de se reconhecerem limitações à metodologia na formulação de SMA (Gardete, 2016). Este método foi executado com base na norma EN 12697-34.

3.3.2 Fabrico de provetes e determinação da Baridade

Foram executadas séries de 4 provetes para cada percentagem de betume. Estas percentagens fizeram-se variar em 0,5% por série, sendo as percentagens de betume escolhidas as de 6, 6,5 e 7%. No Quadro I.1 e Quadro I.2 do APÊNDICE I, podem ser consultadas a composição dos provetes assim como, as massas volúmicas dos constituintes.

Para cada provete utilizou-se uma massa de cerca de 1200g, de modo a produzir cilindros com as dimensões de 101,6 mm de diâmetro e $63,5 \pm 1,5$ mm de altura.

Por se tratar de uma MBT cujo aditivo era uma cera orgânica, a temperatura alvo de mistura foi de 120°C. No entanto, uma vez que a MBR era introduzida à temperatura ambiente era necessário saber qual a temperatura que os agregados deveriam ter na altura da produção da mistura, de modo a que o conjunto dos constituintes ficasse à temperatura alvo desejada. Segundo Baptista (Baptista, 2006) a temperatura de aquecimento dos agregados é dada pela Equação 3.1.

(3.1)

$$T_a = T_m \times (1 + R) - R \times T_F + 5 \times R \times h \times (637 - T_F) + \Delta T_a$$

Onde,

T_a – temperatura de aquecimento dos agregados novos (°C);

T_m – temperatura de amassadura da mistura (°C);

ΔT_a – fator de correção devido às perdas de calor durante a mistura (°C);

R – rácio entre a massa de material reciclado e agregados novos;

T_F – temperatura inicial do material reciclado (°C);

h – humidade do material fresado.

Sabendo que o material reciclado é colocado a frio, aproximadamente a 20°C, que as perdas de calor estimadas são de 10% e que o rácio entre a massa de material reciclado e agregados novos é 0,27, em trabalho anterior (Antunes, 2014) calculou-se a temperatura de aquecimento dos agregados, considerando o betume 35/50 aquecido a 140°C, tendo-se obtido uma temperatura próxima de 160°C.

Após o estabelecimento das temperaturas dos constituintes, procedeu-se à produção de provetes, misturando 20% de MBR a frio com os agregados novos e a quantidade de betume necessária para cada uma das percentagens de ligante em estudo, adicionando também a dosagem estabelecida de aditivo *VIATOP® plus CT 40*. Os vários constituintes da mistura podem ser visualizados na Figura 3.6.



Figura 3.6 Representação dos vários constituintes da mistura. Da esquerda para a direita: agregados virgens, MBR, betume novo e aditivo

De seguida procedeu-se à pesagem e adição de todos os constituintes da mistura, produzindo uma amassadura em misturador automático, durante 5 minutos, sendo que, o tempo de mistura para uma SMA, segundo a norma EN 12697-35, é de 4 minutos, optou-se acrescer 1 minuto à amassadura devido à quantidade relativamente elevada de MBR. Colocou-se o material resultante da amassadura em moldes cilíndricos de aproximadamente 100 mm de diâmetro, procedendo-se à compactação por compactador de impacto, com 50 pancadas por face, de acordo com a norma EN 12697-30.

3.3.3 Ensaio de compressão Marshall

O ensaio de compressão Marshall foi realizado conforme o estabelecido em EN 12697-34, comprimindo os provetes na chamada prensa Marshall, tal como se representa na Figura 3.7. Este é um ensaio destrutivo de compressão no interior de duas meias canas de aço, medindo-se a estabilidade (S) e a deformação (f). A velocidade de compressão é de 50,8 mm/min e a condição de paragem é a rotura completa do provete.



Figura 3.7 Ensaio de compressão Marshall

De referir que todos os provetes foram ensaios à temperatura de 60 °C e os valores de estabilidade e deformação registados.

Neste ensaio, é frequente a obtenção de resultados de estabilidade relativamente baixos, para misturas do tipo SMA, o que pode conduzir à conclusão errada de que este tipo de mistura tem um comportamento fraco à deformação permanente (Drüschner et al, 2000; Gardete, 2016). Os resultados obtidos apresentam-se no subapêndice 3.3.4 a propósito da determinação da percentagem ótima em betume.

3.3.4 Caracterização volumétrica e percentagem ótima de betume

Após a compactação, desmoldaram-se e catalogaram-se os provetes, e foi feita a sua pesagem a seco e imersos, conforme o exemplificado na Figura 3.8. Por se tratar de uma mistura de granulometria aberta, na pesagem imersa efetuou-se a selagem dos provetes por meio de parafina aquecida a 70°C.



Figura 3.8 Preparação e pesagem dos provetes Marshall (Antunes, 2016)

Após as pesagens estarem concluídas calculou-se a baridade da mistura, p_b , segundo a norma EN 12697-6 – Procedimento C (proвете selado), estabelecido para misturas de granulometria aberta, por intermédio da Equação 3.2.

(3.2)

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{\frac{m_2 - m_3}{\rho_w} - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}}$$

Onde,

ρ_{bsea} – massa volúmica (proвете selado) (kg/m^3);

m_1 – massa do provete seco (g);

m_2 – massa do provete selado com parafina seco (g);

m_3 – massa do provete selado com parafina imerso (g);

ρ_w – densidade da água à temperatura do ensaio (kg/m^3);

ρ_{sm} – densidade da parafina (kg/m^3).

Além da baridade, para determinar as características volumétricas pretendidas, determinou-se também a baridade máxima teórica, a porosidade, o VMA (volume de vazios da mistura de agregados) e o VFB (o volume de vazios preenchidos com betume). A primeira foi obtida com o auxílio do picnómetro de vácuo, conforme se representa na Figura 3.9, utilizando o procedimento A (método volumétrico) da norma EN 12697-5.

Este processo pressupõe a desagregação completa de cada provete e sua colocação no picnômetro de vácuo, imerso em água. A aplicação de uma pressão negativa no interior do recipiente e a aplicação de vibrações ao picnômetro permite retirar o ar presente na água e amostra, de modo a realizar as pesagens necessárias para o cálculo, de acordo com a Equação 3.3.



Figura 3.9 Determinação de baridade máxima teórica com o picnômetro de vácuo

(3.3)

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w}$$

Onde,

ρ_{mv} – baridade máxima teórica da mistura betuminosa (método volumétrico) (kg/m³);

m_1 – massa do picnômetro com a tampa (g);

m_2 – massa do picnômetro com a tampa e a amostra (g);

m_3 – massa do picnômetro com a tampa, a amostra e a água (g);

V_p – volume do picnômetro, cheio de água até à marca de referência (m³);

ρ_w – densidade da água à temperatura do ensaio (kg/m³).

Tendo em conta os valores calculados para a baridade e para a baridade máxima teórica é possível, de acordo com as Equações 3.4, 3.5 e 3.6 calcular os valores para a porosidade (V_m), para o VMA e para o VFB.

(3.4)

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100$$

Onde,

V_m – porosidade de uma mistura (%);

ρ_m – baridade máxima teórica da mistura betuminosa (kg/m^3);

ρ_b – Baridade do provete (kg/m^3).

(3.5)

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B}$$

(3.6)

$$VFB = \frac{(B \times \rho_b) / \rho_B}{VMA} \times 100$$

Onde,

VMA – percentagem de vazios na mistura de agregados (%);

B – percentagem de betume do provete (em 100% da mistura) (g);

ρ_B – densidade do betume (kg/m^3);

ρ_b – Baridade do provete (kg/m^3);

V_m – porosidade (%);

VFB – percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume (%).

No Quadro 3.8 encontram-se os valores médios das propriedades Marshall calculados, para cada um dos grupos de provetes com diferentes percentagens de betume.

Quadro 3.8 Resumo dos valores calculados para a formulação Marshall

Betume (%)	Baridade, ρ_{bsea} (kg/m^3)	Baridade Máxima Teórica, ρ_{mv} (kg/m^3)	Porosidade, V_m (%)	VMA (%)	VFB (%)	S (kN)	f (mm)
6,0	2275	2390	5,2	18,5	71,7	8,23	4,5
6,5	2282	2334	3,0	17,4	82,9	8,97	4,2
7,0	2302	2363	1,9	17,6	89,1	7,73	5,6

A representação gráfica das características que são consideradas no método de Marshall é a melhor forma de analisar a variação das várias grandezas em função da percentagem de betume e de determinar a sua percentagem ótima, tal como mostra a Figura 3.10.

Os dados referentes ao cálculo das características volumétricas podem ser consultados no Quadro I.3 e no Quadro I.4 do APÊNDICE I. Os valores resultantes do ensaio de compressão Marshall podem ser consultados no Quadro I.5 do APÊNDICE I.

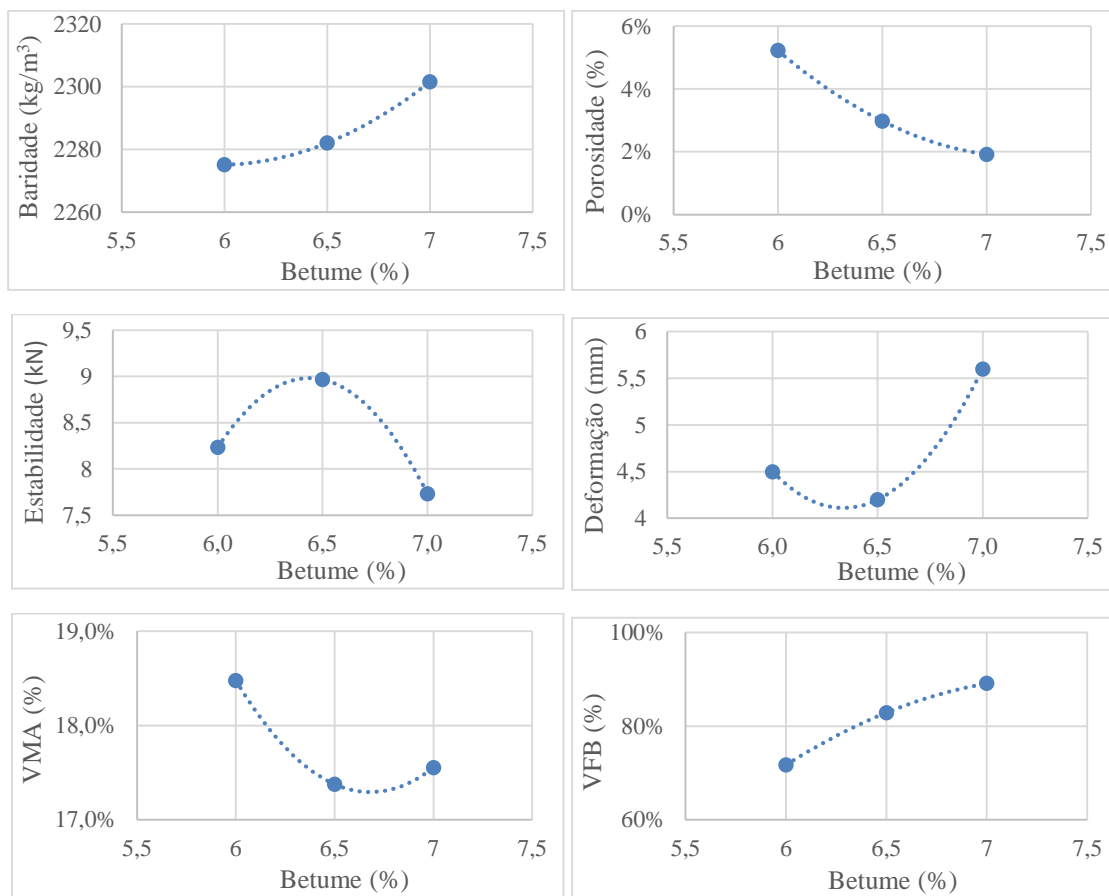


Figura 3.10 Representação gráfica das características da mistura betuminosa em função da percentagem de betume dos provetes Marshall

A percentagem ótima de betume é calculada através da média correspondente à máxima estabilidade, à máxima baridade e ao valor médio dos limites impostos para a porosidade. Devido à larga experiência alemã no estudo de SMA, considerou-se os limites da porosidade entre 3% e 4%, imposto pela especificação ZTV-Asphalt Stb 01 (Drüschner et al, 2000).

Deste modo, conclui-se que a percentagem ótima de betume será 6,6%. No entanto, esta percentagem conduziria a uma porosidade inferior a 3%, pelo que a avaliação da percentagem ótima deverá ser feita em relação à máxima porosidade admissível de 4%, pelo que a percentagem ótima será por sua vez 6,3%. Os valores das características para a percentagem ótima de betume poderão ser consultadas no Quadro 3.9.

Quadro 3.9 Resumo de características da mistura betuminosa para a percentagem ótima de betume

Mistura	Betume (%)	Porosidade (%)	Estabilidade Marshall (kN)	Deformação Marshall (mm)	VMA (%)	Quociente Marshall (kN/mm)	VFB (%)
SMA 12,5	6,3	3,7	8,9	4,1	17,8	2,2	79,1

3.4 Ensaio de Schellenberg – Avaliação do Escorrimento de Betume

Como já referido anteriormente, as misturas do tipo SMA são caracterizadas por terem uma granulometria descontínua, pelo que é aconselhada uma análise à drenagem do betume. A norma EN 12697-18 indica o ensaio de *Schellenberg* como o apropriado para misturas que contenham aditivo estabilizador. Com este ensaio procura-se aferir se a quantidade de fibras celulósicas é o apropriado para evitar o escorrimento do betume.

O ensaio de *Schellenberg* é realizado com recurso a um copo, no qual se colocou uma massa de 1200g, a uma temperatura de 25 °C acima da temperatura de compactação, pelo que o ensaio realizou-se a 150°C, durante um período de 60 minutos \pm 1 minuto.

De acordo com a norma EN 12697-18, o valor resultante do ensaio corresponde à percentagem de massa que fica no copo de ensaio quando este é virado de base para cima durante 10 segundos.

O valor obtido para o escorrimento foi de 0,068%. Em comparação a normativa americana AASHTO M 325-08 (AASHTO, 2008), conclui-se que o valor está bastante abaixo do limite estipulado por esta norma que é 0,3%, pelo que a quantidade de fibras utilizado é suficiente.

4 ENSAIOS DE DESEMPENHO MECÂNICO

4.1 Enquadramento

Para complementar o estudo da SMA, uma vez que o método de Marshall é de natureza empírica e não permite avaliar de forma totalmente esclarecedora misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt*, optou-se por efetuar ensaios de desempenho para avaliar a sensibilidade à água, a resistência à deformação permanente e o módulo de rigidez.

Os ensaios de avaliação da sensibilidade à água da mistura em estudo foram realizados num estudo anterior (Antunes, 2014).

Para a realização dos ensaios de desempenho à deformação permanente e ao módulo de rigidez por tração indireta por compressão diametral, foi utilizada a máquina servo-pneumática de aplicação de cargas repetidas, modelo UTM- 14P, desenvolvida pela empresa australiana IPC Global, existente no Laboratório de Pavimentos Rodoviários do ISEC. Para a avaliação do módulo de rigidez por flexão em quatro pontos, utilizou-se o equipamento de marca *Cooper*, modelo CRT-SA4PT-BB, existente no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do IST.

4.2 Estudo da Sensibilidade à Água – Resistência Conservada

O ensaio à sensibilidade à água demonstra a sua importância no que concerne à avaliação da perda de resistência que as misturas betuminosas compactadas sofrem quando submetidas à presença de água no seu interior. Esta perda também fornece um bom indicador quanto à sua durabilidade (InIR, 2009).

A norma atualmente utilizada em Portugal para a realização deste tipo de ensaio é a norma europeia EN 12697-12, pelo que o ensaio foi executado de acordo com esta, seguindo as especificações do método A previsto nesta norma.

O ensaio da sensibilidade à água de uma mistura consiste na seleção de dois grupos de provetes cilíndricos com características similares. O primeiro destes grupos é acondicionado “ao ar” e à temperatura de 25°C, enquanto que o segundo é mantido em vácuo em água a uma pressão de $6,7 \pm 0,3$ kPa, durante 30 ± 5 min, e posteriormente acondicionado em banho de água à temperatura de 40 ± 1 °C entre 68 horas e 72 horas.

Após este acondicionamento os provetes foram ensaiados à compressão diametral de modo a avaliar a sua resistência à tração indireta (ITS), de acordo com a norma EN 12607-23.

O parâmetro ITS_d é o valor desta resistência para os provetes secos e o parâmetro ITS_w o valor da resistência para os provetes acondicionados em água. A avaliação da sensibilidade à água não é mais que o quociente entre aqueles dois parâmetros, em percentagem de acordo com a Equação 4.1.

(4.1)

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} (\%)$$

Onde:

ITS_w : resistência a tração indireta dos provetes acondicionados em água;

ITS_d : resistência à tração indireta dos provetes a seco;

ITSR: resistência conservada em tração indireta.

De referir que foram executados 6 provetes com características similares e com percentagem ótima de betume de 6,3%, anteriormente calculada na formulação *Marshall*, e divididos de modo a criar dois grupos com baridades próximas. Tais resultados podem ser consultados no Quadro II.6 e no Quadro II.7 do APÊNDICE II.

De acordo com os resultados obtidos, e após a aplicação da equação 4.1, o valor da sensibilidade é de 88%, o qual, de acordo com o Quadro 4.1, definido na norma EN 13108-1, pertence à segunda categoria de ITRS mais exigente ($ITSR_{80}$), assim concluindo que a mistura em causa tem um comportamento bastante satisfatório na presença de água e poderá ter características benéficas para a sua durabilidade.

Quadro 4.1 Categorias de ITRS constantes na norma EN 13108-1, relativas ao ensaio de sensibilidade à água

Limites Mínimos de ITRS (%)	Categoria ITRS
90	$ITSR_{90}$
80	$ITSR_{80}$
70	$ITSR_{70}$
60	$ITSR_{60}$
Sem Requisitos	$ITSR_{NR}$

Para consulta mais rigorosa dos dados e resultados referentes a este ensaio deverá ser consultado o Quadro II.8 e o Quadro II.9 do APÊNDICE II

4.3 Avaliação da resistência à deformação permanente

4.3.1 Considerações Iniciais

Um dos grupos de patologias que podem ser verificadas em pavimentos flexíveis é a formação de rodeiras de pequeno raio. Este fenómeno pode ter como causas o elevado tráfego pesado, a elevada temperatura na superfície do pavimento, a espessura e resistência da camada betuminosa de desgaste. Para um cenário em que tanto a temperatura como o tráfego permanecem inalterados, quanto maior a resistência menor será a espessura de material a aplicar, trazendo possíveis benefícios económicos e ambientais a curto e longo prazo. A resistência aos assentamentos que ocorrem nas camadas de desgaste dá-se o nome de resistência à deformação permanente.

Pode avaliar-se a capacidade das misturas betuminosas para resistir à deformação permanente através de vários tipos de ensaios, tais como o ensaio uniaxial de carga estática, o ensaio uniaxial de cargas repetidas, o ensaio de *wheel tracking* ou de pista, e o ensaio de tração indireta, entre outros. Como de dispunha de equipamento para a realização do ensaio uniaxial de cargas repetidas, realizado de acordo com a norma europeia EN 12697-25, optou-se por caracterizar a mistura através daquele procedimento. Esta norma indica dois métodos de ensaio por compressão uniaxial, tendo sido seguido o Método A – Compressão axial com aplicação de cargas repetidas com confinamento.

4.3.2 Fabrico e Características dos provetes de ensaio

Para execução do ensaio foram produzidos 15 provetes, 5 unidades para cada uma das três percentagens de betume estudadas (6, 6,5 e 7%). As dimensões requeridas pela norma de ensaio para os provetes são de aproximadamente 150 mm de diâmetro e 60 ± 2 mm de altura. Recorreu-se à compactação por vibro-compressão em molde com recurso a um martelo vibrador, conforme de pode ver na Figura 4.1, com um peso adicional de 32 kg.



Figura 4.1 Equipamento de compactação vibratória em molde com recurso a martelo

Após a compactação e desmoldagem dos provetes, procedeu-se à medição do seu diâmetro e altura, cujos valores se encontram representados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 Altura e diâmetro medidos dos provetes ensaiados

Betume (%)	6,0					6,5					7,0				
Proвете	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
Altura (mm)	65,1	64,0	57,6	62,0	62,4	58,3	63,0	58,7	62,3	62,2	60,9	61,6	58,7	60,4	60,9
Diâmetro (mm)	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152

Através da leitura dos valores da altura dos provetes verifica-se que certos provetes estão fora do limite de 60 ± 2 mm aconselhados pela norma. Desta forma, e de modo a alcançar resultados mais fidedignos, não se consideraram os provetes cuja altura mais se distanciava da altura alvo de 60 ± 2 mm. Também se excluíram alguns provetes cuja porosidade apresentava valores mais afastados da média dos restantes. Desta forma foram excluídos os provetes 2.1 e 2.2 do grupo de 6% de betume, 3.2 do grupo de 6,5% de betume e 4.2 e 4.5 do grupo de 7% de betume.

As características de todos os provetes ensaiados à deformação permanente podem ser consultadas com maior detalhe no Quadro II.10 do APÊNDICE II.

No seguimento da determinação das características geométricas dos provetes para ensaio, determinou-se a sua baridade, de acordo com a norma EN 12697-6. No Quadro 4.3 pode consultar-se os valores médios obtidos para cada grupo de percentagem de betume.

Quadro 4.3 Dimensões e baridade dos provetes ensaiados

Betume (%)	Diâmetro (mm)	Altura média (mm)	Baridade (kg/m^3)
6,0	152,0	60,7	2254
6,5	152,0	60,3	2266
7,0	152,0	60,0	2270

Após a execução dos ensaios de compressão uniaxial cíclica, cujos resultados serão apresentados mais adiante, procedeu-se ao cálculo da baridade máxima teórica pelo procedimento volumétrico, de acordo com a norma EN 12697-5. O cálculo da baridade máxima teórica permite o cálculo da porosidade (V_m), do volume de vazios da mistura de agregados (VMA) e o volume de vazios preenchidos com betume (VFB), de acordo com a norma EN 12697-8. No Quadro 4.4 poderão ser consultados os resultados obtidos para estas propriedades volumétricas.

Quadro 4.4 Baridade máxima teórica, porosidade, VMA e VFB médios por percentagem de betume

Betume (%)	Baridade Máxima Teórica (kg/m ³)	Porosidade, V _m (%)	VMA (%)	VFB (%)
6,0	2392	5,7	18,9	69,9
6,5	2368	4,3	18,6	76,9
7,0	2361	4,0	19,5	79,4

Para análise complementar, é necessário comparar as propriedades volumétricas obtidas para este tipo de provetes, com as propriedades volumétricas dos provetes de compressão Marshall, apresentados no Capítulo 3, e já estudados num trabalho anterior (Antunes, 2014). Esta comparação torna-se importante pois, apesar da mistura em questão ser igual, o método de compactação, e as próprias dimensões dos provetes, são diferentes. O Quadro 4.5 e o Quadro 4.6 comparam, para os provetes Marshall e para os provetes compactados por vibro-compressão, os valores da baridade e da baridade máxima teórica.

Quadro 4.5 Comparação dos valores de baridade e baridade máxima teórica obtidos para os provetes compactados por vibro-compressão (φ150mm) e para os provetes Marshall (φ100mm)

Características volumétricas	Baridade (kg/m ³)			Baridade máxima teórica (kg/m ³)		
	6,0	6,5	7,0	6,0	6,5	7,0
Provetes com 150mm, resistência à deformação permanente	2254	2266	2270	2392	2368	2361
Provetes com 100 mm, form. Marshall (Antunes, 2014)	2275	2282	2302	2390	2334	2363

Quadro 4.6 Comparação dos valores de porosidade, VMA e VFB obtidos para os provetes compactados por vibro-compressão (φ150mm) e para os provetes Marshall (φ100mm)

Características volumétricas	Porosidade, V _m (%)			VMA (%)			VFB (%)		
	6,0	6,5	7,0	6,0	6,5	7,0	6,0	6,5	7,0
Provetes 150mm, Resistência à deformação permanente	5,7	4,3	4,0	18,9	18,6	19,5	69,9	76,9	79,4
Provetes 100 mm, form. Marshall (Antunes, 2014)	5,2	3,0	1,9	18,5	17,4	17,6	71,7	82,9	89,1

Verifica-se que os provetes Marshall, compactados com 50 pancadas por face, apresentaram valores de baridade um pouco mais elevados e, portanto, menores valores de porosidade, o que resultou em valores de VMA inferiores e VFB superiores que os obtidos para os provetes com 150 mm de diâmetro. Para os provetes com 6% de betume as diferenças das propriedades volumétricas entre os dois grupos são muito pequenas.

4.3.3 Condições de ensaio, sua execução e resultados obtidos

Como se referiu, os ensaios de compressão uniaxial foram realizados à luz da norma EN 12697-25, tendo-se seguido a técnica de ensaio na qual se garante algum confinamento ao material da mistura durante o ensaio, conseguido pela aplicação de carga uniaxial numa das bases do cilindro com uma placa de diâmetro inferior ao do provete.

A geração de um certo confinamento do material durante a aplicação de carga é importante, na medida em que procura reproduzir em laboratório condições de solicitação mais próximas das que ocorrem no pavimento quando este estiver em serviço, pois o material circundante à área de pressão da carga também contribui para a sua resistência. Na Figura 4.2 pode ver-se um aspeto da montagem dos ensaios realizados, bem como uma ilustração simbólica das tensões atuantes (Buchanan, 2007). Para simular um certo confinamento, a norma exige uma pressão de contato induzida por um prato de carregamento com aproximadamente 100 mm de diâmetro, de modo a que a parte dos provetes de 150 mm de diâmetro que fica fora do prato de carregamento produza uma carga de confinamento à zona interior do provete cilíndrico. Durante o ensaio essa tensão de confinamento foi considerada pelo software de aquisição de dados, tendo sido registado um valor de 29,4 kPa, constante para todos os provetes.

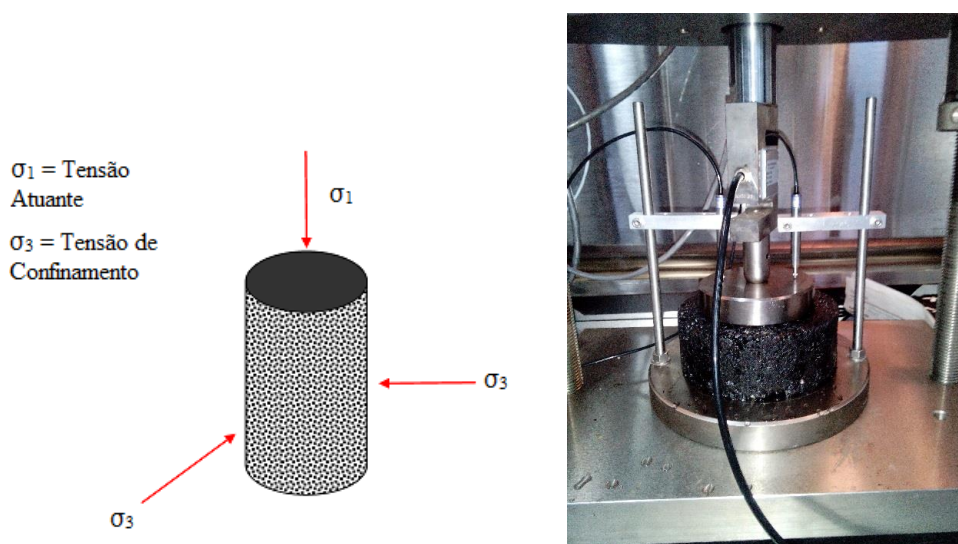


Figura 4.2 Modelo de tensões atuante [adaptado de (Buchanan, 2007)] e aspeto geral do ensaio

Relativamente à temperatura de ensaio, considerou-se a temperatura de 60 °C, a qual reproduz condições térmicas gravosas para o desenvolvimento de deformação permanente em camadas

betuminosas. Antes de ser efetuado o ensaio, todos os provetes permaneceram durante 4 horas e não mais que 7 horas na câmara de acondicionamento à temperatura estipulada.

De acordo com a norma de ensaio, foi aplicada uma pré-carga estática de 10 kPa durante os primeiros 10 minutos de ensaio, seguida de uma carga dinâmica com 0,5 Hz de frequência, ou seja, 1 segundo de carregamento e 1 segundo de repouso, conforme o diagrama apresentado na Figura 4.3. Esta carga variável ao longo do tempo foi definida com um valor de pico de 100 kPa, aplicando-se 3600 ciclos de carga durante o ensaio.

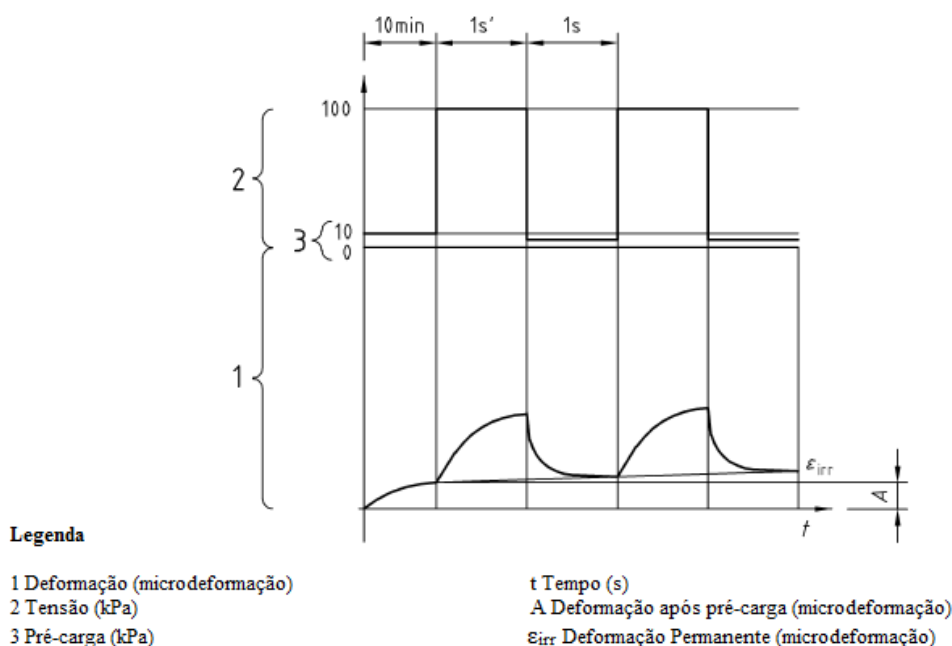


Figura 4.3 Esquema de deformação em resposta a carga dinâmica (adaptado de EN 12697 - 25)

Um dos parâmetros obtidos nos ensaios é a deformação permanente dos provetes em milímetros cujos valores podem ser consultados no Quadro 4.7. Note-se que, para a avaliação da resistência à deformação permanente não foram considerados todos os provetes produzidos, de modo a cumprir as tolerâncias de altura estabelecidas pela norma de ensaio para os provetes. Contudo, procurou-se correlacionar os resultados dos ensaios com as alturas dos provetes, de modo a confirmar que o incumprimento das tolerâncias influenciam bastante os resultados. A análise do gráfico da Figura 4.4 permite concluir que a variável deformação permanente e altura apresentam uma correlação forte. Deste modo, confirma-se a bondade das tolerâncias indicadas na norma de ensaio, o que levou à decisão de apenas analisar os resultados dos provetes selecionados.

Quadro 4.7 Altura e deformação axial acumulada para todos os provete ensaiados

Betume (%)	6,0					6,5					7,0				
Proвете	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
Altura (mm)	65,1	64,0	57,6	62,0	63,4	58,3	63,0	58,7	62,3	62,2	60,9	61,6	58,7	60,4	60,9
Deformação axial acumulada (mm)	0,858	0,400	0,210	0,560	0,532	0,231	0,539	0,169	0,385	0,405	0,426	0,360	0,260	0,254	0,189

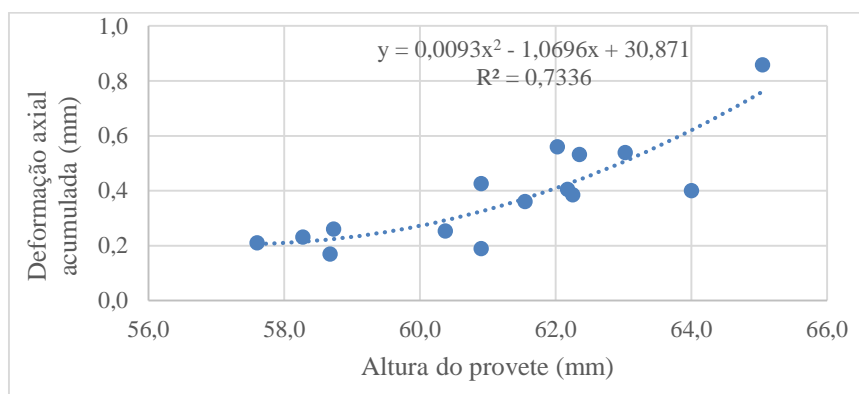


Figura 4.4 Relação entre a altura dos provetes e a sua deformação

Para a interpretação dos ensaios, a norma indica o cálculo de determinados parâmetros, como a deformação axial acumulada após n ciclos (ϵ_n), em percentagem da altura do provete e a taxa de deformação (*creep rate*) num dado intervalo de ciclos em que a deformação é constante e quase linear (f_c), em $\mu\epsilon/\text{ciclo}$. O cálculo dos referidos parâmetros pode fazer-se pelas Equações 4.2 e 4.3.

(4.2)

$$\epsilon_n = 100 \left(\frac{h_0 - h_n}{h_0} \right)$$

Onde:

ϵ_n – deformação axial acumulada do provete após n aplicações de carga (%);

h_0 – altura média do provete medida após aplicação da pré-carga (mm);

h_n – altura média do provete medida após n aplicações de carga (mm).

(4.3)

$$f_c = \frac{\epsilon_{n1} - \epsilon_{n2}}{n_1 - n_2}$$

Onde:

f_c – taxa de deformação ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$);

ϵ_{n1} ; ϵ_{n2} - deformação axial acumulada do provete após n_1 e n_2 aplicações de carga ($\mu\epsilon$);

n_1 ; n_2 – número de aplicações de ciclos de carga.

A análise das Equações 4.2 e 4.3 permite concluir que o parâmetro ϵ_n é um rácio entre a quantidade de deformação medida após n ciclos de carga e a altura inicial do provete após aplicação da pré-carga especificada, o que pretende mitigar o efeito das diferenças de alturas entre os provetes. O parâmetro f_c permite estabelecer um termo comparativo entre diferentes provetes e materiais, medindo a velocidade a que dada mistura deforma. Deverá ser calculado para um certo intervalo de ciclos, em que a deformação varie de forma aproximadamente linear com o número de ciclos de ensaio. Assim, optou-se por efetuar o cálculo de f_c no intervalo de ciclos [1020:3600].

A Figura 4.5 mostra as curvas médias da evolução da deformação permanente dos provetes para as três percentagens de betume, tendo-se calculado os parâmetros de resistência à deformação permanente para os provetes selecionados cujos resultados se apresentam no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 Resultados obtidos para o ensaio à deformação permanente

Betume (%)	Altura média (mm)	Porosidade, V_m (%)	Deformação axial (mm)	Deformação axial ϵ_{3600} (%)	Taxa de deformação, f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)
6,0	59,8	5,4	0,434	0,621	0,716
6,5	60,3	4,3	0,298	0,388	0,406
7,0	60,0	4,0	0,313	0,428	0,476

Da análise do Quadro 4.8 e da Figura 4.5, pode concluir-se que os parâmetros de deformação não têm a distribuição esperada em função da percentagem de betume da mistura. Em geral, quanto maior é a percentagem de betume, maior é a deformação dos provetes, no entanto, a mistura com 6% de betume é a que exibe maior deformação. Esta tendência pode observar-se para os resultados individuais representados na Figura II.1 do APÊNDICE II.

Uma explicação possível para o pior resultado da composição com 6% de betume pode ser a relativa baixa quantidade de betume para envolver todos os agregados, não promovendo uma boa coesão dos provetes deste grupo. Note-se que, cerca de 16,5% da massa de betume na mistura é betume envelhecido proveniente da MBR. Se parte deste betume não for efetivo nas suas propriedades ligantes, a composição terá uma quantidade de betume efetivo menor que 6%, o que para uma SMA pode revelar-se insuficiente.

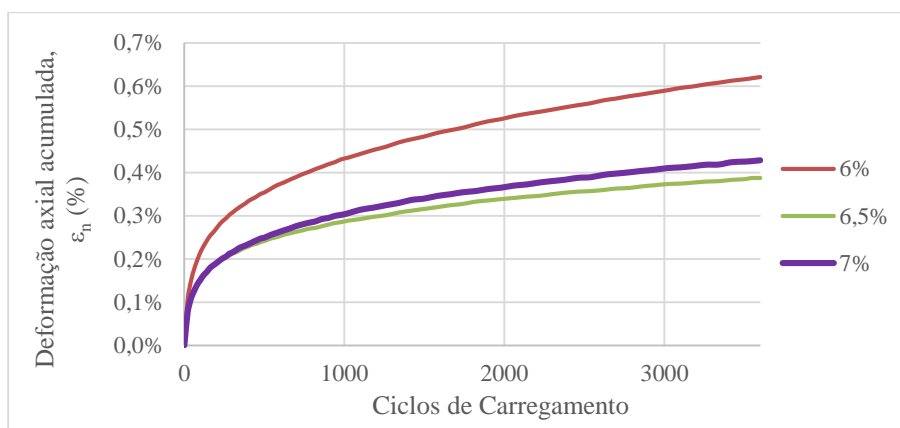


Figura 4.5 Andamento das curvas de deformação ao longo do ensaio (valores médios)

Para consulta dos resultados do ensaio de resistência à deformação permanente aconselha-se a visualização do Quadro II.11 do APÊNDICE II.

4.4 Avaliação do módulo de rigidez

4.4.1 Condições Iniciais

A avaliação de módulo de rigidez de misturas betuminosas considera-se de extrema importância para a sua caracterização mecânica. Para materiais elásticos o módulo de rigidez resulta da relação linear entre a tensão aplicada no material e a deformação induzida, a chamada lei de *Hooke*. No caso das misturas betuminosas o material tem um comportamento visco-elástico para temperaturas intermédias, pelo que o cálculo do módulo é uma relação não linear entre a tensão e a deformação induzida. Se a deformação for medida numa direção diferente daquele em que se aplica a tensão, o módulo é afetado pelo coeficiente de *Poisson*.

Devido aos recursos disponíveis, numa primeira fase optou-se por medir o módulo de rigidez através da realização do ensaio de tração indireta em provetes cilíndricos (IT-CY), cujo esquema está representado na Figura 4.6, realizado de acordo com as especificações patentes no Anexo C da norma EN 12697-26. Adicionalmente, para a mistura de 6,5% de betume foram realizados ensaios de flexão em quatro pontos, em provetes prismáticos (4PB-PR), cujas especificações são constantes do Anexo B da norma EN 12697-26.

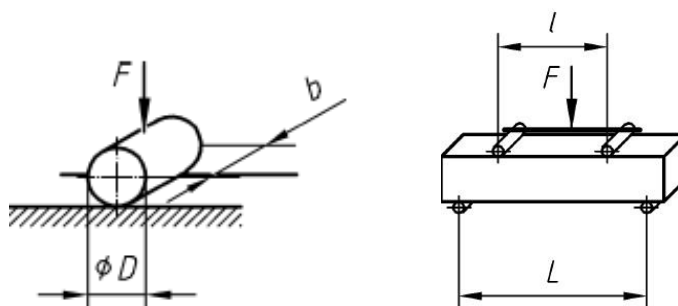


Figura 4.6 Esquema de ensaio de tração indireta em provetes cilíndricos (IT-CY) e do ensaio de flexão em 4 pontos de provetes prismáticos (4PB-PR), adaptado de EN 12697-26

Para adicionar mais dados relevantes à análise do módulo de rigidez, efetuou-se também a análise do modelo de previsão da *Shell*, exposta mais à frente.

4.4.2 Fabrico e Características dos provetes de ensaio

➤ Ensaio de tração indireta em provetes cilíndricos (IT-CY)

Para a realização do ensaio IT-CY foram executados 7 provetes com 100 mm de diâmetro e 2 provetes com 150 mm de diâmetro, para cada percentagem de betume, totalizando 21 provetes no primeiro caso e 6 no segundo. Por este ser um ensaio não destrutivo, mantendo a temperatura baixa e o nível de carregamento baixo, os provetes foram utilizados posteriormente nos ensaios de fendilhamento por fadiga, designadamente no caso dos provetes com 100 mm de diâmetro.

Para o fabrico dos provetes de 100 mm de diâmetro recorreu-se ao método já utilizado anteriormente para a formulação *Marshall*, compactando os provetes pela aplicação de 50 pancadas em cada face. Os provetes de 150 mm de diâmetro foram fabricados recorrendo-se ao

método de vibro-compactação com martelo já apresentado anteriormente. O aspeto geral dos provetes após desmoldagem pode ser observado na Figura 4.7.



Figura 4.7 Aspeto geral dos provetes de 100mm de diâmetro (à esquerda) e 150mm de diâmetro (à direita), ensaiados à tração indireta (IT-CY)

Após a produção dos provetes, foi avaliada a sua baridade (SSD - provete saturado com a superfície seca). No Quadro 4.9 estão representadas as características geométricas e as baridades dos provetes utilizados nos ensaios IT-CY.

Quadro 4.9 Características geométricas e baridade média por percentagem de betume

Betume (%)	Altura (mm)		Baridade (kg/m ³)	
	Provetes 100mm	Provetes 150mm	Provetes 100mm	Provetes 150mm
6,0	64,4	62,2	2302	2250
6,5	64,1	62,2	2268	2260
7,0	64,0	60,6	2273	2244

Através da observação destes resultados conclui-se que a baridade é próxima das baridades a que se chegou no estudo de formulação Marshall (Antunes, 2014). Por isso assumiu-se que, os valores da porosidade, VMA e VFB, são da mesma ordem de grandeza. Estes poderão ser consultados no Quadro 3.8, já apresentado anteriormente na formulação Marshall.

Já para os provetes de 150 mm de diâmetro foram calculadas as suas propriedades volumétricas, que se apresentam resumidas no Quadro 4.10. Resultados das propriedades volumétricas mais detalhados podem ser consultados no Quadro II.14 do APÊNDICE II.

Quadro 4.10 Valores médios de baridade, baridade máxima teórica, porosidade, VMA e VFB por percentagem de betume para os provetes de 150mm de diâmetro

Betume (%)	Baridade Máxima Teórica (kg/m ³)	Porosidade (%)	VMA (%)	VFB (%)
6	2386	6,0	19,1	68,5
6,5	2368	4,4	18,7	76,4
7	2345	4,5	19,7	77,3

➤ **Ensaio de flexão em quatro pontos em provetes prismáticos (4PB-PR)**

Para o ensaio 4PB-PR optou-se apenas pelo fabrico de provetes com 6,5% de betume para comparar os resultados com os dos ensaios IT-CY.

Para o fabrico dos provetes foi executada uma laje com aproximadamente 50mm de espessura, utilizando um cilindro compactador de rolos na sua compactação. A partir desta laje obtiveram-se 5 provetes prismáticos com as dimensões especificadas na norma EN 12697-26, através de corte por serra, cujo aspeto final é ilustrado na Figura 4.8.



Figura 4.8 Aspeto de laje e provetes prismáticos usados no ensaio 4PB-PR

Após o fabrico dos provetes, procedeu-se à sua medição e ao cálculo da sua baridade, valores que podem ser consultados no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 Características geométricas e baridade média para provetes prismáticos

Betume (%)	Comprimento médio (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Baridade (kg/m ³)
6,5	397,8	50,6	48,8	2306

Os valores obtidos para a baridade são próximos dos obtidos para os provetes Marshall, compactados no compactador de impacto, pelo que a porosidade, o VMA e o VFB, embora não tenham sido calculados neste caso, apresentarão valores da mesma ordem de grandeza que os obtidos no estudo de formulação.

4.4.3 Condições de ensaio, sua execução e resultados obtidos

➤ Ensaio de tração indireta em provetes cilíndricos (IT-CY)

De acordo com a norma europeia EN 12697-26 foi executado do ensaio de tração indireta, comumente referido como *Indirect Tensile Test* (Yan et al, 2010).

A onda de carregamento neste tipo de ensaio tem um andamento pulsatório, aproximadamente sinusoidal, que permite alguma variação da sua frequência. Como se mostra na Figura 4.9, a definição da curva estabelece-se através definição do tempo de carga, do valor da carga de pico e do seu período de repetição. O rácio entre a área representada a sombreado e o produto do tempo de carga pela carga de pico, é chamado de fator de carga.

O outro gráfico representado também na Figura 4.9 representa as curvas típicas de uma deformação medida como resposta à onda de carregamento imposta. Devido às características visco-elásticas do material, este exhibe sempre uma deformação residual não recuperável após cada ciclo de carregamento.

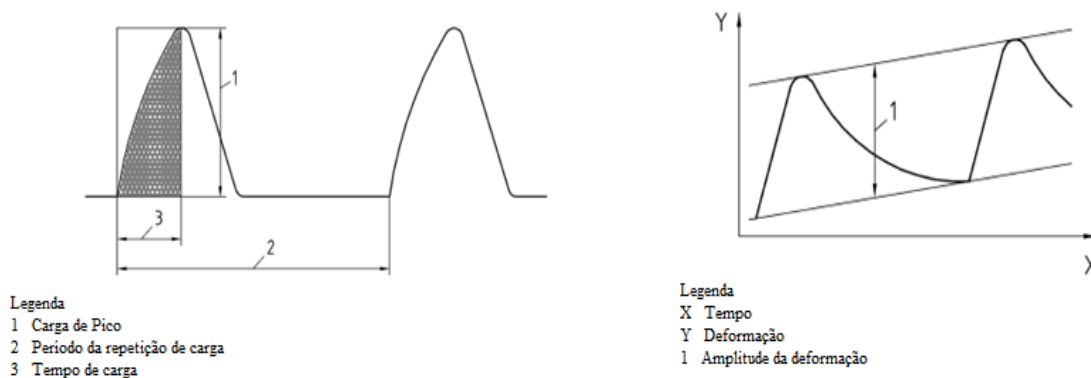


Figura 4.9 Onda de carregamento e onda de deformação, adaptado de EN 12697-26

Para um fator de carga de 0,60, o cálculo do módulo de rigidez deverá ser feito diretamente através da Equação 4.4, caso contrário deverá ser convertido para um fator de carga de 0,60, de acordo com a Equação 4.5.

(4.4)

$$S_m = \frac{F \times (v + 0,27)}{(z \times h)}$$

Onde:

S_m – módulo de rigidez medido, expresso em megapascal (MPa);

F – o valor de pico da carga vertical aplicada, expressa em Newton (N);

z – amplitude da deformação horizontal obtida durante o ciclo de carga, expressa em milímetros (mm);

h – altura média do provete, expressa em milímetros (mm);

ν – coeficiente de Poisson.

Neste caso, por o valor do coeficiente de Poisson não ser determinado previamente, estipulou-se o valor de 0,35.

No caso do valor do fator de carga ser diferente de 0,60, utiliza-se a Equação 4.5 para correção.

(4.5)

$$S'_m = S_m \times (1 - 0,322 \times (\log(S_m) - 1,82) \times (0,60 - k))$$

Onde:

S'_m – módulo de rigidez, expresso em megapascal (MPa), ajustado ao fator de carga 0,60;

k – fator de carga medido;

S_m – módulo de rigidez medido, expresso em megapascal (MPa) para o fator de carga k , expresso em graus Celsius (°C).

A norma recomenda um tempo de carga de 124 ± 4 ms e um período de $3,0 \pm 0,1$ s. Para a carga de pico esta deverá ser a suficiente para atingir a deformação alvo de $5 \mu\text{m}$, no caso dos provetes de 100 mm, e $7 \mu\text{m}$, no caso dos provetes de 150 mm. Quando se controla a deformação durante o ensaio e a força aplicada é a necessária para produzir a extensão desejada, o ensaio é realizado em condições de controlo de deformação.

Definiu-se uma temperatura de ensaio de 20°C e adotaram-se 3 frequências de carregamento, na gama permitida pelo equipamento.

Para fazer variar a frequência de carregamento recorreu-se à consulta do ábaco de Van der Poel (Van der Poel, 1954) que relaciona a frequência de carregamento, f , em Hz, e os tempos de carregamento, t_c , em segundos. Por sua vez a Universidade de Nottingham (UN, 1986), propõe uma relação, traduzida na Equação 4.6, entre o tempo de carregamento e a velocidade de circulação do tráfego, V .

(4.6)

$$t_c = \frac{1}{V}$$

A relação entre estas 3 grandezas pode ser verificada no Quadro 4.12.

Quadro 4.12 Representação dos valores de frequência correspondente aos tempos de carga e da velocidade de circulação do tráfego

Frequência (Hz)	Tempo de carga (s)	Velocidade de circulação de tráfego (km/h)
30	0,005	200,0
20	0,0075	133,3
10	0,015	66,7
5	0,03	33,3
3	0,05	20,0
2	0,075	13,3
1	0,15	6,7

A partir da representação gráfica destes valores, pode-se concluir que a relação entre a frequência e o tempo de carregamento é dada pela Equação 4.7 (Baptista, 2006).

(4.7)

$$t_c = \frac{0.15}{f}$$

É usual nos estudos correntes de avaliação do módulo de deformabilidade a definição das frequências de 1Hz, 5 Hz e 10Hz, pelo menos, por serem condizentes com valores de velocidade média de tráfego realistas. No entanto, devido a limitações no *software* de aquisição de dados, não foi possível estabelecer frequências de carregamento tão altas, fixando-se os valores em 1Hz, 2Hz e 3Hz, correspondendo a tempos de carregamento de 0,15, 0,075 e 0,050 s.

De uma forma resumida, as condições de ensaio utilizadas estão definidas no Quadro 4.13.

Quadro 4.13 Condições gerais de ensaio do ensaio IT-CY

Temperatura	20°C
Frequência	1Hz, 2Hz, 3Hz
Deformação alvo	5µm (φ100 mm) 7 µm (φ150 mm)

O equipamento utilizado e respetiva montagem é o representado na Figura 4.10, sendo de notar que a montagem não engloba a bitola de alinhamento de LVDT conforme exigido no Anexo C da norma EN 12697-26, pelo que, a colocação de provetes na montagem teve de ser o mais rigorosa possível de modo a mitigar eventuais assimetrias.

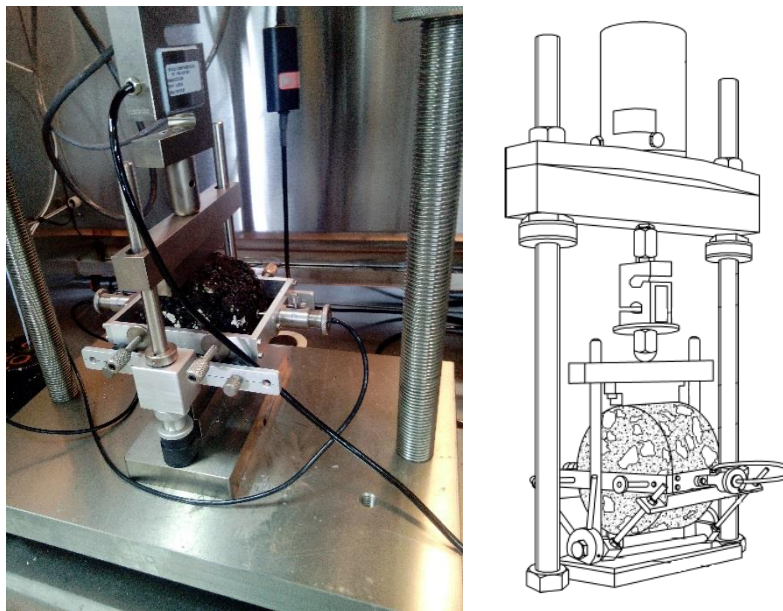


Figura 4.10 Montagem do ensaio de tração indireta (IT-CY) para determinação do módulo de rigidez e modelo exemplificativo (adaptado de EN 12697-26)

Desta forma, cada provete foi mantido na câmara de ensaio a uma temperatura constante de 20°C durante, pelo menos, 4 horas. Foram registadas as temperaturas dentro da câmara de ensaio e no interior de um provete não ensaiado de características similares aos restantes, através de uma sonda de temperatura.

De seguida efetuou-se o ensaio com ondas de carregamento a 1, 2 e 3Hz e, novamente, 1Hz, de modo a que haja garantias de o provete não ter sofrido dano durante o ensaio.

Para cada provete e cada frequência aplicaram-se 10 impulsos de carga prévios, de forma a calibrar a carga necessária para produzir a deformação alvo estipulada. Depois, o carregamento aplicado foi de 5 impulsos, os quais são utilizados para o cálculo do módulo de rigidez. Por último, voltou-se a repetir o ensaio no mesmo provete rodando-o 90° em relação à posição inicial sobre o seu eixo axial. Assim, o valor do módulo de rigidez é a média dos 2 valores obtidos, desde que a sua diferença seja menor que +10% e menor que -20%.

O ensaio foi executado em 27 provetes, 9 unidades por cada percentagem de betume, perfazendo um número total de 162 ensaios. Tendo em conta que o ensaio para cada provete se realiza na posição 0° e 90° e a 3 frequências diferentes, conforme referido anteriormente. Deste total de ensaios foram rejeitados 4 resultados de acordo com as exigências da norma de ensaio (EN 12697-26).

De seguida apresenta-se no Quadro 4.14, os valores médios do módulo de rigidez e tensão atuante, por percentagem de betume e por frequência de carregamento, e corrigidos para o fator

de carga 0,60. Os valores medidos para todos os provetes de 100 mm de diâmetro, podem ser consultados no Quadro II.14, no Quadro II.15e no Quadro II.16, do APÊNDICE II. Para os provetes de 150 mm de diâmetro deverá ser consultado o Quadro II.17.

Quadro 4.14 Resultados médios obtidos para o valor do módulo de rigidez e para a tensão atuante de acordo com a variação de frequência de carregamento e da percentagem de betume

Módulo de Rigidez, E (MPa)						
Betume (%)	Provetes 100mm, def. alvo = 5μm, 20°C			Provetes 150mm, def. alvo = 7μm, 20°C		
	Frequência de carregamento (Hz)					
	1	2	3	1	2	3
6,0	7369	7824	8554	5505	5565	6274
6,5	6105	7142	8026	4854	6337	7970
7,0	5874	6738	7707	5605	7571	7530
Tensão Atuante, σ (kPa)						
6,0	381	412	384	277	277	260
6,5	320	380	372	236	289	272
7,0	306	353	375	293	332	275

De forma a ter um melhor entendimento destes valores, traçou-se um gráfico representado na Figura 4.11, na qual é possível ver a evolução dos valores do módulo de rigidez, de acordo com a variação da frequência de carregamento para os provetes de diâmetro de 100 mm. Como seria de esperar, o valor do módulo aumenta quando a frequência aumenta. Adicionalmente, pode-se verificar que a mistura com 6 % betume na sua composição é a que mostrou ter maiores valores de rigidez, observando-se que quando maior é a percentagem de betume menor é o seu módulo de rigidez. As expressões que resultaram do ajuste de linhas de tendência dão indicações sobre o tipo de evolução observada para os valores. À exceção da evolução da tensão aplicada para a mistura com 6% de betume, os valores dos fatores de determinação obtidos são geralmente elevados, o que mostra a bondade do ajuste.

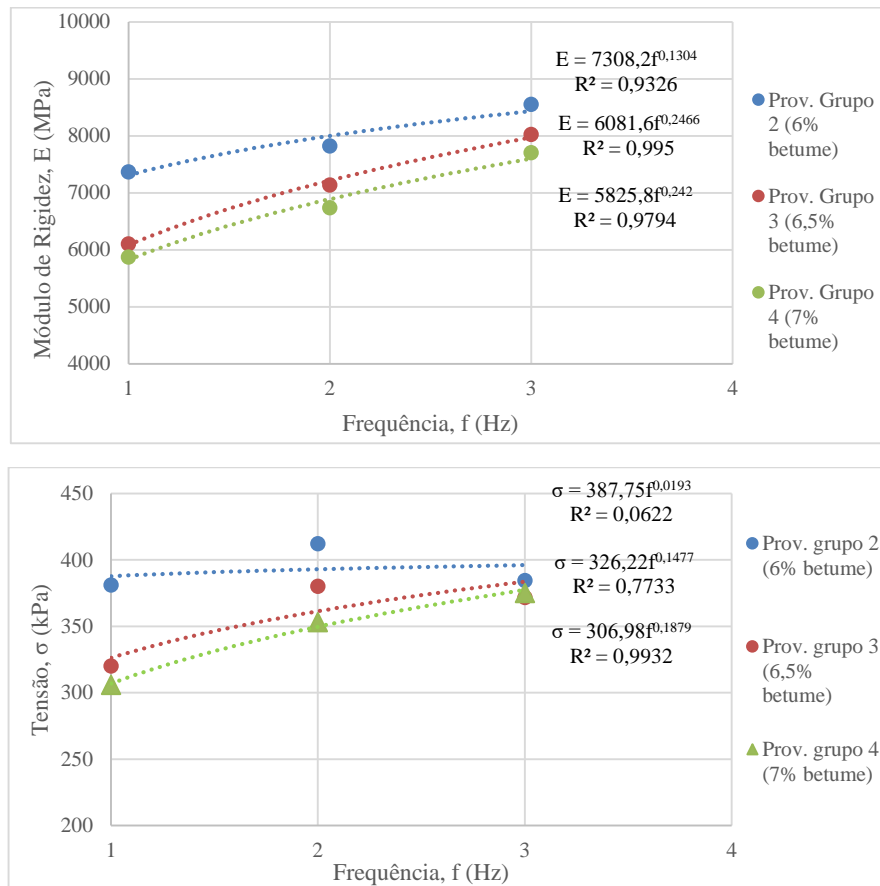


Figura 4.11 Representação gráfica da relação entre a frequência de carregamento e o módulo de rigidez, e a tensão atuante para provetes de 100mm de diâmetro e deformação alvo de 5 μ m

Traçando o mesmo tipo de gráfico para os resultados do ensaio dos provetes de 150 mm de diâmetro, que pode ser visto na Figura 4.12, conclui-se que os valores dos módulos de rigidez obtidos são diferentes dos obtidos para os provetes de 100mm de diâmetro. Isto deve-se em parte às características volumétricas diferentes entre os dois grupos de provetes (os provetes com 150 mm são mais porosos), mas também aos diferentes níveis de tensão atuantes para obtenção das respectivas deformações alvo. No entanto, o andamento das curvas não é o que seria de esperar. Para os provetes de 150mm de diâmetro, a mistura com maior módulo de rigidez é a que tem maior percentagem de betume na sua composição, assim como, a mistura com menor percentagem de betume apresenta a menor rigidez e o menor crescimento à medida que a frequência aumenta.

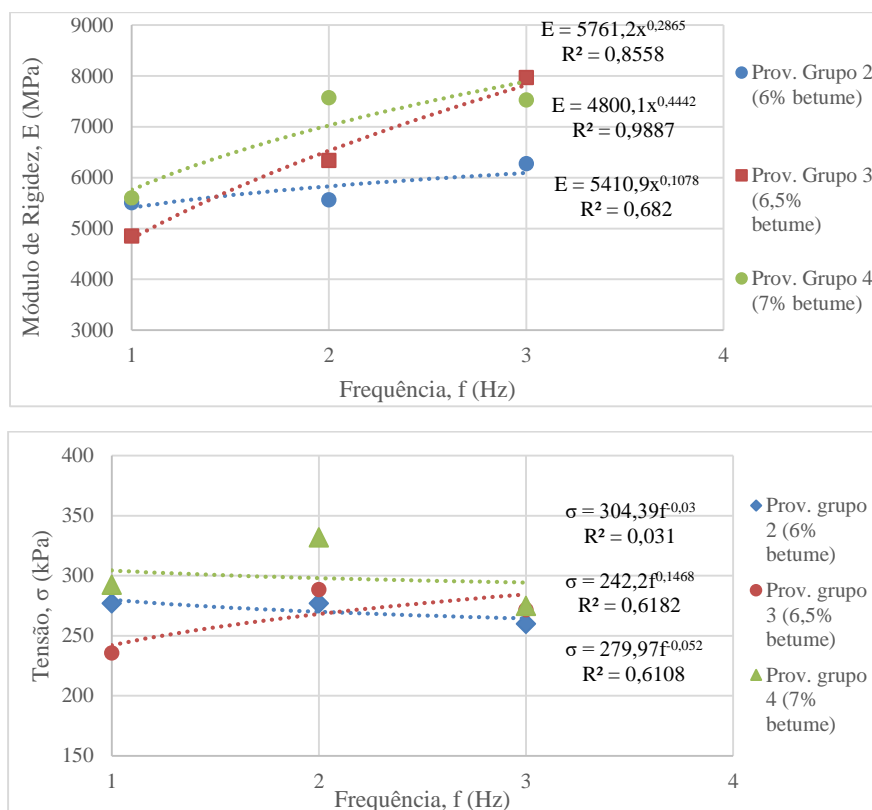


Figura 4.12 Representação gráfica da relação entre a frequência de carregamento e o módulo de rigidez, e a tensão atuante para provetes de 150mm de diâmetro e deformação alvo de 7μm

➤ Ensaio de flexão em quatro pontos em provetes prismáticos (4PB-PR)

Os ensaios de flexão para a medição do módulo de rigidez foram realizados de modo a incluir a gama de frequências e temperatura utilizadas nos ensaios de compressão diametral, de modo a estabelecer um ponto de comparação entre os resultados do módulo de rigidez obtidos com base nos dois tipos de ensaios. Complementarmente, mede-se o ângulo de fase, o qual mede o desfasamento no tempo entre a onda da carga e a onda da deformação. Valores do ângulo de fase baixos (zero corresponde a um comportamento elástico) obtêm-se para carregamento rápidos e temperaturas baixas. Valores altos (90° corresponde a um comportamento viscoso) são típicos de carregamentos lentos e temperaturas altas.

O carregamento foi definido de acordo com o Anexo B da norma EN 12697-26, sendo o suficiente para produzir uma deformação de 50με, tendo-se aplicado uma onda de carregamento sinusoidal. A frequência de carregamento fez-se variar no espetro de frequências de 1, 3, 5, 10, 20 e 30Hz, sendo que no final o provete voltou a ser carregado a 1Hz, de modo a aferir de foi induzido ou não, algum dano por fadiga.

No Quadro 4.15 apresentam-se resumidamente as condições de ensaio usadas.

Quadro 4.15 Condições gerais do ensaio de avaliação do módulo de rigidez em ensaios 4PB-PR

Temperatura	20°C
Frequência	1Hz, 3Hz, 5Hz, 10Hz, 20Hz e 30Hz
Deformação alvo	50 $\mu\epsilon$

No tratamento de dados após a realização do ensaio, foram excluídos todos os ciclos de carga em que a deformação não é estável no valor de 50 $\mu\epsilon$. Isso acontece geralmente nos primeiros ciclos de carga. Nesse período, ao contrário do ensaio de tração indireta, em que a calibração da força é feita previamente, aqui a força vai se ajustando à correta deformação durante o carregamento. Os resultados obtidos para o módulo de rigidez, para a tensão aplicada e para o ângulo de fase estão reunidos no Quadro 4.16.

Quadro 4.16 Resultados médios obtidos para o valor do módulo de rigidez, tensão atuante e ângulo de fase, de acordo com a variação de frequência de carregamento

Módulo Rigidez, E (MPa)						
Betume (%)	Frequência (Hz)					
	1	3	5	10	20	30
6,5	2931	3771	4290	5001	5752	6181
Tensão, σ (kPa)						
6,5	145	187	214	249	286	309
Ângulo de fase, ϕ (°)						
6,5	25,2	20,8	20,6	17,2	12,7	8,7

Após a compilação destes valores médios, traçou-se os gráficos do módulo de rigidez, tensão atuante e ângulo de fase, representados na Figura 4.13. Verifica-se que as evoluções das grandezas representadas têm o andamento esperado. O módulo de rigidez e a tensão aumentam quando a frequência de carregamento aumenta, e o ângulo de fase diminui.

Outro aspecto relevante é que os módulos de rigidez obtidos nos ensaios de flexão são significativamente menores (menos de 50%) do que os resultantes do ensaio de tração indireta.

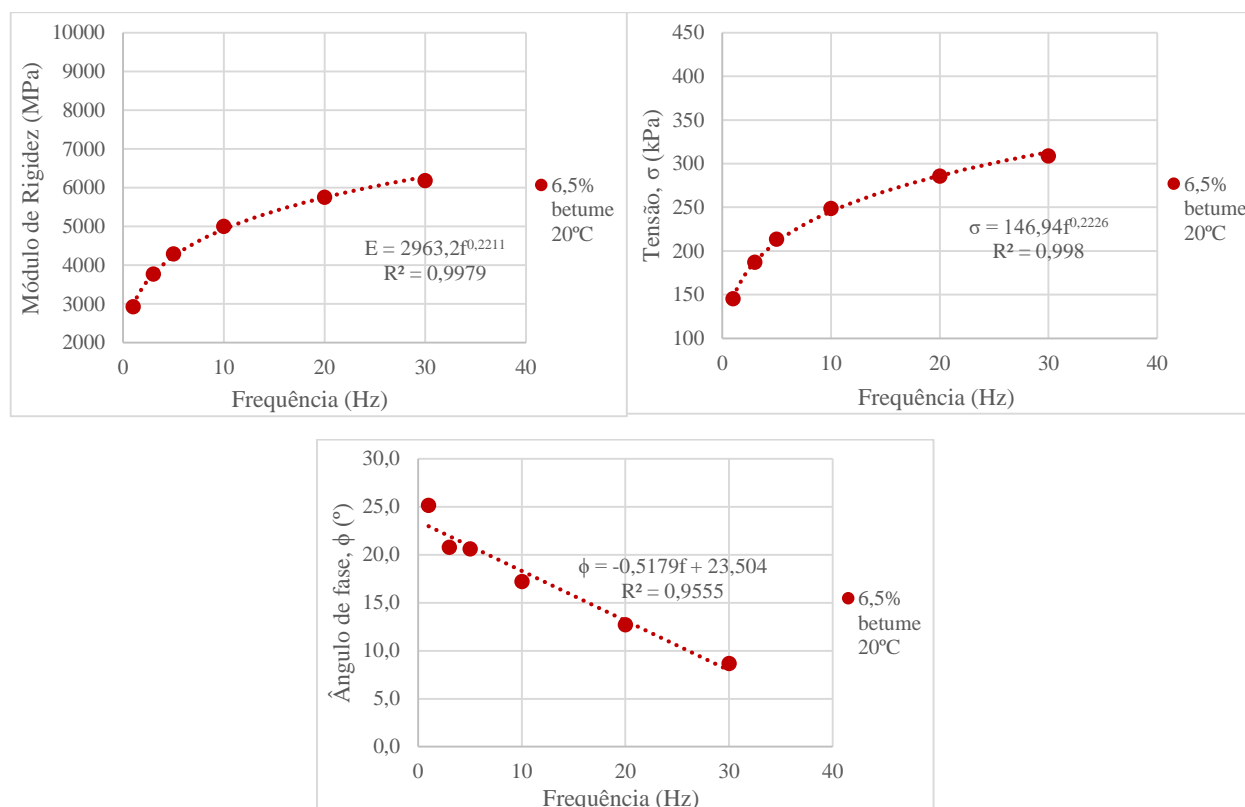


Figura 4.13 Representação gráfica do módulo de rigidez, E, tensão atuante, σ e ângulo de fase, ϕ , de acordo com a variação da frequência de carregamento.

Tanto as características geométricas e volumétricas como os resultados de todas as vigas ensaiadas em 4PB-PR, podem ser consultadas no Quadro II.18 e no Quadro II.19 do APÊNDICE II.

4.4.4 Análise do módulo de rigidez pelo modelo de previsão da Shell

Em análise complementar à determinação do módulo de rigidez através de ensaios experimentais, tentou-se correlacionar os seus resultados com os de um modelo de previsão empírico-mecânico, como é o método da *Shell* (Claessen et al. 1977).

Este modelo assenta na previsão do módulo de rigidez através da determinação da rigidez do betume, S_b , na percentagem volumétrica de agregado, V_a , e de betume, V_b .

A rigidez do betume depende dos seus parâmetros característicos, como a temperatura de amolecimento anel e bola, T_{ab} , e da sua penetração a 25°C, pen_{25} , para além das condições de serviço a que o pavimento vai estar sujeito, como é o caso da temperatura de serviço (T) e o tempo de carregamento (t_c), ou velocidade média do tráfego.

No Quadro 4.17 são apresentados os parâmetros característicos do betume presente na mistura. Devido à falta de ensaios de caracterização do betume presente na MBR, arbitrou-se o valor de penetração pen_R , como sendo 15 (10^{-1} mm). Valores próximos deste têm sido obtidos noutros trabalhos que envolveram a utilização de MBR, como o apresentado por Baptista (Baptista,

2006). A partir deste valor arbitrado e das Equações 4.8 e 4.9 (Baptista, 2006), determinaram-se os parâmetros do betume para a mistura final.

Quadro 4.17 Parâmetros característicos de penetração a 25°C e temperatura de amolecimento de anel e bola dos betumes contidos na mistura

Características do betume	Novo, 35/50 Repsol®	Envelhecido, MBR	Mistura Final
Penetração (mm) [25°C; 100g; 5s]	41	15*	39
Temperatura de amolecimento (°C)	55,4	68,1	56,1

*Valor arbitrado

(4.8)

$$\log(\text{pen}_R) = \text{TRb} \times \log(\text{pen}_F) + (1 - \text{TRb}) \times \log(\text{pen}_N)$$

(4.9)

$$\text{Tab}_R = \text{TRb} \times \text{Tab}_F + (1 - \text{TRb}) \times \text{Tab}_N$$

Onde,

pen_R – penetração do ligante envelhecido do material fresado (10^{-1} mm);

TRb – taxa de reciclagem de betume;

pen_F – penetração do ligante final (10^{-1} mm);

pen_N – penetração do betume de adição (10^{-1} mm);

Tab_R – temperatura de amolecimento do ligante envelhecido do material fresado (°C);

Tab_F – temperatura de amolecimento do ligante final (°C);

Tab_N – temperatura de amolecimento do betume novo (°C).

Após a determinação das características do betume, importa saber os outros parâmetros fundamentais na aplicação do Método da *Shell*, os quais podem ser visualizados no Quadro 4.18.

Como esta é uma análise comparativa com os ensaios mecânicos já apresentados anteriormente, estabeleceu-se uma temperatura de serviço de 20°C, portanto, igual à usada naqueles. Para além disto, calculou-se V_b (percentagem volumétrica de betume) e V_a (percentagem volumétrica de agregado), de acordo com a percentagem de betume e a porosidade de cada grupo de provetes. Já no cálculo da velocidade média do tráfego, esta foi feita através da aplicação das Equações

4.6 e 4.7, as quais permitem a conversão da frequência de carregamento em tempo de carregamento e/ou velocidade.

Quadro 4.18 Características volumétricas da mistura, de acordo com o Método da Shell

Modelo de Ensaio - Provetes	Betume (%)	T (°C)	Porosidade, V_m (%)	V_b (%)	V_a (%)	VMA (%)
ITS - $\phi 100\text{mm}$	6,0	20	5,4	12,7	81,9	18,1
	6,5	20	2,6	14,0	83,4	16,6
	7,0	20	1,9	15,0	83,1	16,9
ITS - $\phi 150\text{mm}$	6,0	20	6,0	12,6	81,4	18,6
	6,5	20	4,4	13,7	81,9	18,1
	7,0	20	4,5	14,6	80,9	19,1
4PB - viga	6,5	20	2,7	13,9	83,4	16,6

Com base nos valores apresentados no Quadro 4.19, e utilizando as leis de previsão do módulo de rigidez da *Shell* (Claessen et al. 1977, também disponíveis em Branco et al. 2008), traçaram-se as curvas do módulo de rigidez, em função da frequência de carregamento, tal como se representa na Figura 4.14.

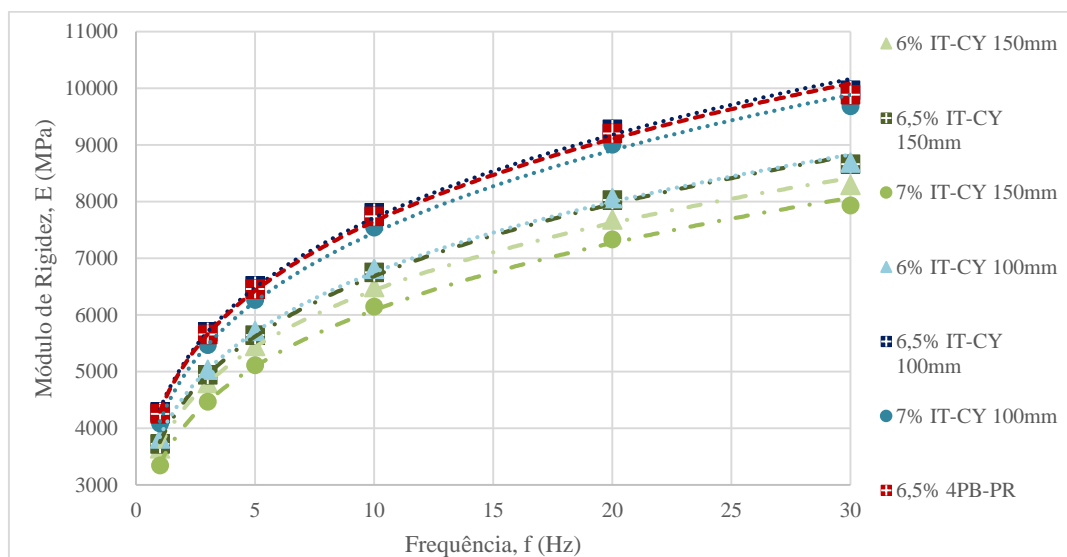


Figura 4.14 Representação gráfica da variação do módulo de rigidez consoante a variação da frequência de carregamento para as características dos provetes ensaiados, de acordo com o Método da *Shell*

Através da observação do gráfico da Figura 4.14, conclui-se que os grupos com menores valores previsíveis de módulo de rigidez são aqueles que maior porosidade apresentam, ou seja, os referentes aos provetes com 150 mm de diâmetro. Os valores do módulo de rigidez previstos para os provetes com 100 mm de diâmetro e para os provetes prismáticos com 6,5% de betume

foram muito próximos, sendo da ordem de grandeza dos obtidos experimentalmente nos ensaios IT-CY em provetes com 100 mm de diâmetro.

4.5 Análise de resultados

4.5.1 Considerações Iniciais

Neste subcapítulo analisam-se os resultados apresentados ao longo do Capítulo 4 e também dos resultados da formulação *Marshall* apresentada no Capítulo 3. Desta forma, procura-se entender como se relacionam os parâmetros e propriedades determinados, os quais podem contribuir para o desempenho mecânico das misturas betuminosas, procurando estabelecer tendências gerais, se possível, e comparar os resultados obtidos com outros indicados noutros trabalhos.

4.5.2 Estabilidade Marshall

Os valores de estabilidade e deformação *Marshall*, apresentados no subcapítulo 3.3, foram estudados anteriormente por Antunes (Antunes, 2014).

No seguimento da formulação vai fazer-se uma análise mais detalhada aos resultados do ensaio de compressão de *Marshall*, realizado segundo a norma EN 12697-34. Este ensaio é considerado não adequado para misturas descontínuas do tipo SMA, pois estas exibem estabilidade baixa podendo induzir em erro relativamente à sua geral boa resistência à deformação permanente (Drüschner et al, 2000). Na Figura 4.15 apresentam-se os resultados da estabilidade e da deformação.

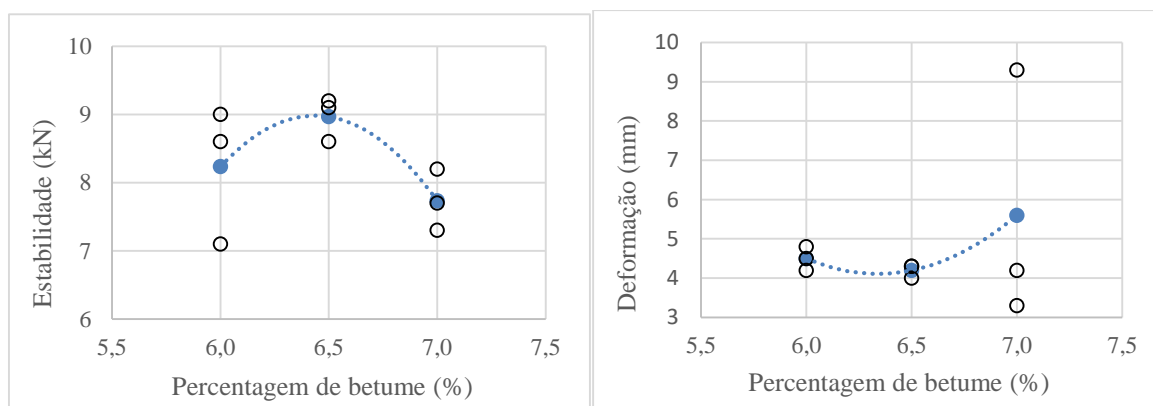


Figura 4.15 Valores de estabilidade e deformação Marshall

Os valores de estabilidade observados estão compreendidos entre 7,5 e 9 kN, considerando-se no nível mais baixo dos valores admissíveis para misturas a quente, normalmente estabelecido em 7,5 kN (EP, 2012). Para a deformação confirma-se a ocorrência de valores elevados, variando entre 4 e 6 mm, quando geralmente para misturas tradicionais, os valores variam entre 2 a 4 mm (EP, 2012; Gardete, 2016).

Da observação dos valores do gráfico da Figura 4.15, conclui-se que a maior estabilidade e a menor deformação ocorrem para uma percentagem de betume próxima de 6,5%, o que corresponde a uma composição próxima da deduzida do estudo de formulação. Caso a

percentagem ótima de betume fosse obtida com base na porosidade de 4%, como se faz em alguns métodos de formulação de SMA, obteríamos também quantidades de betume próximas de 6,5%. Assim, parece que as indicações dadas pelo máximo da estabilidade e pelo mínimo da deformação são coerentes com as decisões que levaram ao estabelecimento da composição a adotar para a SMA em estudo.

4.5.3 Deformação Permanente

No que concerne à resistência à deformação permanente, esta poderá variar em função da composição da mistura e das propriedades volumétricas que daí resultam. A percentagem de betume, a porosidade e/ou baridade são alguns dos parâmetros que influenciam bastante a resistência à deformação permanente. O mesmo acontece com a variação de fatores externos, como a temperatura ou carga induzida no material.

Na Figura 4.16 mostra-se a variação da deformação permanente sofrida pelos provetes nos ensaios de compressão uniaxial (parâmetros ϵ_n e f_c) em função da percentagem de betume. Além de se verificar alguma dispersão dos resultados, observa-se, tal como mencionado atrás, que os valores médios são particularmente elevados para os provetes com 6% de betume.

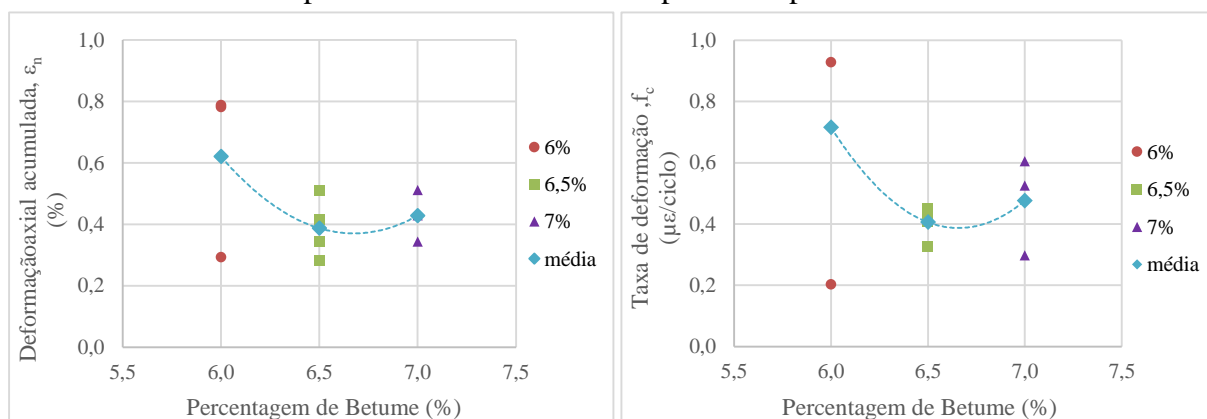


Figura 4.16 Relação grafica entre a deformação axial acumulada e a taxa de formação em relação à percentagem de betume

Anteriormente, sugeriu-se que seria a porosidade e/ou a reduzida quantidade de betume efetiva na SMA com 6% de betume os responsáveis pelo comportamento observado. Assim, procurou saber-se de que forma a porosidade influencia a capacidade de resistência à deformação permanente, para além da percentagem de betume, traçando os gráficos que se apresentam na Figura 4.17, na qual são relacionadas as variáveis ϵ_n e f_c com a variável porosidade dos provetes correspondentes, separando os resultados para cada uma das três percentagens de betume estudadas.

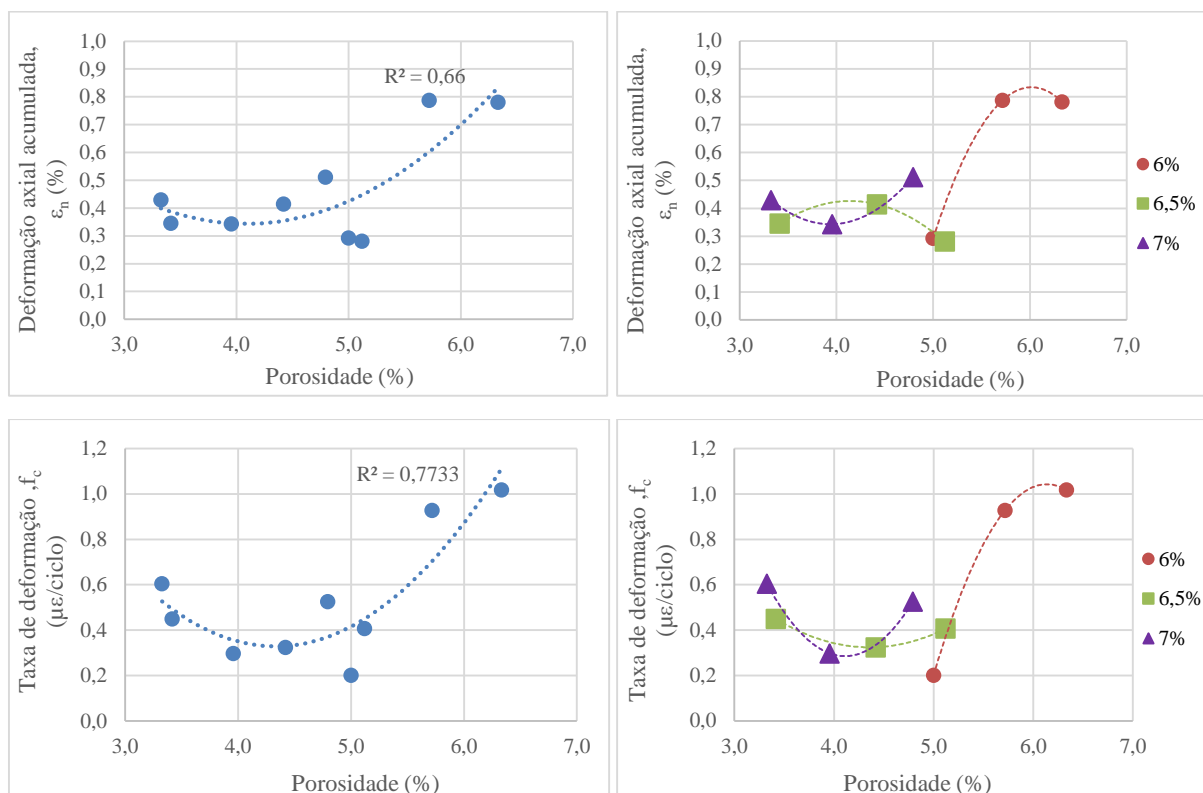


Figura 4.17 Representação gráfica dos resultados dos parâmetros ϵ_n e f_c em função da porosidade da mistura

Verifica-se que a porosidade está correlacionada com os parâmetros de resistência à deformação permanente, mostrando uma correlação moderada/forte entre as variáveis. Como seria de esperar, quanto maior é a porosidade maior tende a ser a deformação axial acumulada nos provetes e a sua taxa de deformação. No entanto, o mínimo da função ajustada aos valores da deformação acontece perto da porosidade de 4%, para a deformação axial acumulada, ϵ_n , e 4,5% para a taxa de deformação, f_c . Esta observação parece confirmar que valores de porosidade da ordem de 4 ou 5% dão origem a SMA resistentes à deformação permanente, mesmo quando a percentagem de betume na mistura é relativamente elevada.

Importa aferir, como consequência destes resultados e do próprio número reduzido de provetes ensaiados por grupo, qual é a fiabilidade destes resultados, para que se possa perceber se é possível estabelecer uma tendência. Com base nisto, recorreu-se a técnicas de cálculo de medidas de dispersão, como o desvio-padrão e o coeficiente de variação, CV, resumidos no Quadro 4.19, para a amostra dos provetes seleccionados para os ensaios.

Quadro 4.19 Valores de desvio-padrão e coeficiente de variação dos resultados de provetes ensaiados à resistência à deformação permanente

Betume (%)	Deformação axial acumulada, ϵ_{3600} (%)			
	Média	Nº provetes	Desvio-padrão	CV (%)
6,0	0,621	3	0,23	37,32
6,5	0,388	4	0,08	21,89
7,0	0,428	3	0,07	16,07
Taxa de deformação f_c ($\mu\epsilon$ /ciclo)				
6,0	0,716	3	0,37	51,04
6,5	0,406	4	0,05	12,23
7,0	0,476	3	0,13	27,31

A análise do Quadro 4.19 permite verificar que há alguma dispersão nos resultados dos parâmetros de avaliação da resistência à deformação permanente. Observa-se uma dispersão maior para os provetes com maior variabilidade de porosidade, ou seja, para os provetes com 6% de betume. Para melhorar a qualidade dos resultados em estudos futuros sobre SMA com MBR deverá aumentar-se o número de provetes ensaiados e estabelecer limites apertados para a variação admissível da porosidade das amostras.

Para alargar o âmbito da análise do comportamento da SMA estudada, vai fazer-se a comparação dos resultados obtidos com outros observados noutros estudos, tendo-se optado, primeiramente, pelos trabalhos de Gardete (Gardete, 2016) e Antunes (Antunes, 2014). No primeiro caso foi estudada uma SMA, similar em termos de granulometria e percentagens de betume, fabricada a quente e sem inclusão de MBR. No segundo caso, a mistura estudada tinha a mesma composição que a avaliada no presente estudo. Em ambos os casos, a avaliação da resistência à deformação permanente baseou-se em ensaios de *Wheel Tracking* (ensaio de pista), realizados a 60°C, pelo que os parâmetros não podem ser diretamente comparados entre si. Contudo, o parâmetro WTS_{air} e f_c medem basicamente o ritmo (velocidade ou taxa) de deformação das amostras à medida que o número de carregamentos aumenta e, por isso, a sua variação com a percentagem de betume pode ser comparável. De facto, a Figura 4.18 apenas pretende comparar tendências de deformação permanente de acordo com a variação da percentagem de betume.

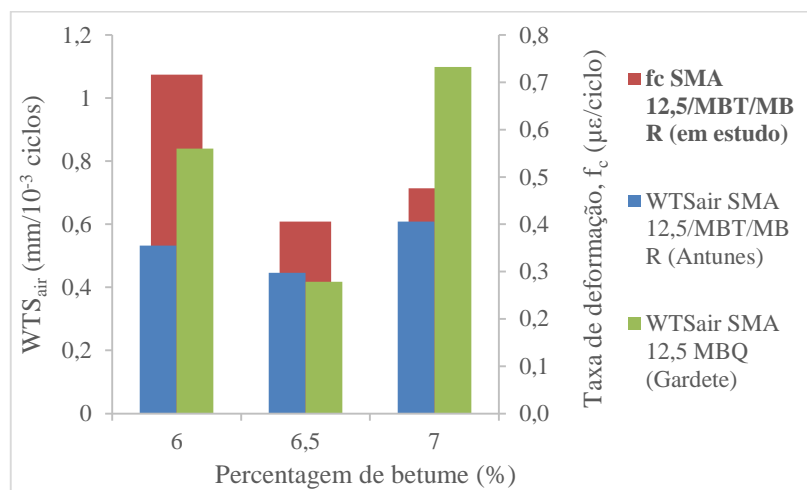


Figura 4.18 Comparação do parâmetro f_c em o parâmetro do ensaio *Whell Tracking*, WTS_{air} observados nos estudos de Gardete (Gardete, 2016) e Antunes (Antunes, 2014)

Conclui-se desta forma que a evolução da deformação permanente com a variação da percentagem de betume apresenta a mesma tendência nos três estudos, embora com algumas diferenças. A SMA com MBR em estudo, com 6% de betume, por ter elevada porosidade apresenta uma resistência à deformação mais fraca, o que não se verificou para a mesma mistura nos ensaios realizados por Antunes (Antunes, 2014). Confirma-se a boa resistência dos três casos para 6,5% de betume. Para 7% de betume, a SMA temperada com MBR manteve uma razoável resistência à deformação permanente, o que não se verificou na SMA a quente sem MBR. Para todos os casos a percentagem de betume intermédia de 6,5% é a que apresenta os melhores resultados.

Vai agora fazer-se uma comparação de resultados obtidos em ensaios realizados em diferentes laboratórios nos quais os parâmetros calculados podem ser comparados entre si. Deste modo, selecionaram-se os estudos de Baptista (Baptista, 2006), Gardete (Gardete, 2006), Mounes (Mounes et al, 2015) e Pasetto (Pasetto et al, 2011), por estes representarem condições de ensaio em conformidade com a norma usada EN 12697-25 - Método A.

De forma a melhor compreender o gráfico comparativo representado na Figura 4.19, aconselha-se a observação do quadro comparativo representado no Quadro II.12 do APÊNDICE II.

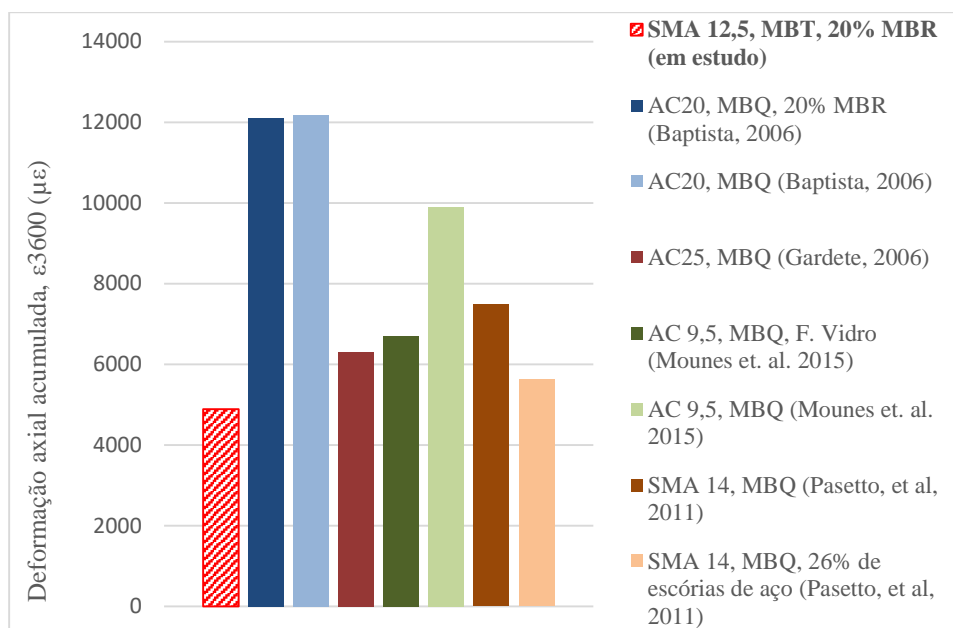


Figura 4.19 Gráfico comparativo de valores de ϵ_{3600} entre misturas ensaiadas à compressão uniaxial com cargas cíclicas segundo a norma EN 12697-25

Através da observação do gráfico representado na Figura 4.19, conclui-se que a mistura em estudo representa valores de deformação axial acumulada mais baixos que as restantes misturas. No entanto, convém ressaltar que as características dos ensaios são diferentes entre si, nomeadamente a temperatura, a tensão induzida e a altura do provete. No exemplo de Gardete (Gardete, 2006) e Baptista (Baptista, 2006), a tensão é 50kPa mais elevada que a mistura em estudo, e a temperatura de ensaio é 15°C mais baixa, enquanto que no exemplo de Mounes (Mounes et al, 2015) e Pasetto (Pasetto et al, 2011), a tensão é igual (100kPa) e a temperatura de ensaio é 20°C mais.

No entanto, atendendo a que, a variável temperatura é mais desfavorável no caso em estudo, é possível afirmar que esta possui um bom comportamento à deformação permanente, mesmo quando comparada com outras misturas do tipo SMA.

4.5.4 Módulo de Rigidez

Para além da variação do módulo de rigidez consoante a frequência de carregamento, interessa também verificar qual é a sua variação consoante a sua percentagem de betume, o que pode ser consultado na Figura 4.20. e na Figura 4.21.

➤ Análise de resultados do ensaio de tração indireta em provetes cilíndricos (IT-CY)

Verifica-se que os valores do módulo de rigidez e a sua evolução é bastante diferente nos dois grupos de diferentes diâmetros ensaiados. No grupo dos provetes de 100 mm de diâmetro é possível verificar que a relação entre as variáveis módulo e percentagem de betume tem uma relação linear forte, com o módulo a decrescer quando a percentagem de betume na composição é maior. No caso dos provetes de 150 mm de diâmetro a tendência é contrária e as variáveis módulo e percentagem de betume apresentam uma fraca relação entre elas.

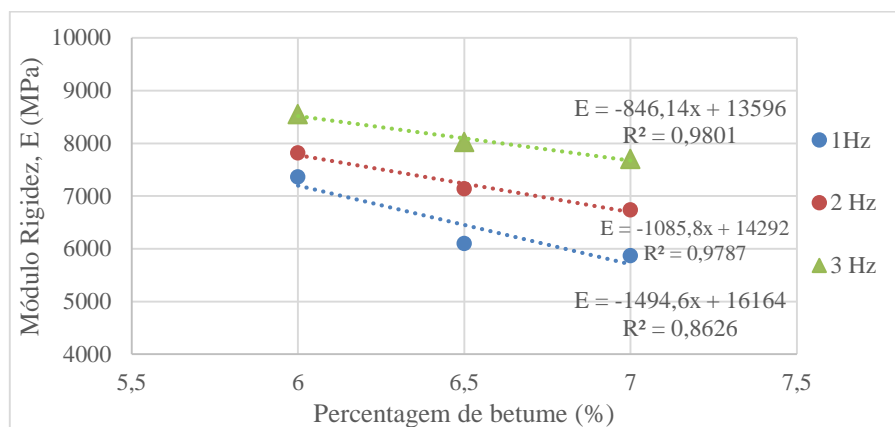


Figura 4.20 Representação gráfica da relação entre a percentagem de betume e módulo de rigidez para provetes de 100mm de diâmetro e deformação alvo de 5µm

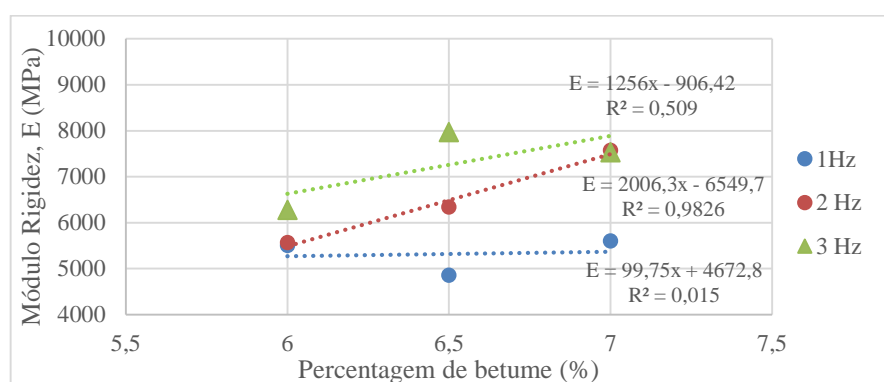


Figura 4.21 Representação gráfica da relação entre a percentagem de betume e módulo de rigidez para provetes de 150mm de diâmetro e deformação alvo de 7µm

Considerando que a porosidade da mistura é uma variável de composição que influencia o módulo de rigidez, apresenta-se na Figura 4.22 a evolução deste com aquela propriedade volumétrica. Note-se que a porosidade é diretamente afetada pela percentagem de betume e também pelo processo de compactação, pelo que a variação observada terá um efeito conjunto destas duas variáveis. Conforme se pode observar, para provetes com 100mm de diâmetro e deformação alvo de 5µm o módulo de rigidez aumenta quando a porosidade aumenta, já para os provetes de 150mm de diâmetro tal não se verifica. De notar que a relação entre as variáveis é forte no primeiro caso, sendo geralmente fraca no segundo, com exceção dos resultados obtidos a 2 Hz.

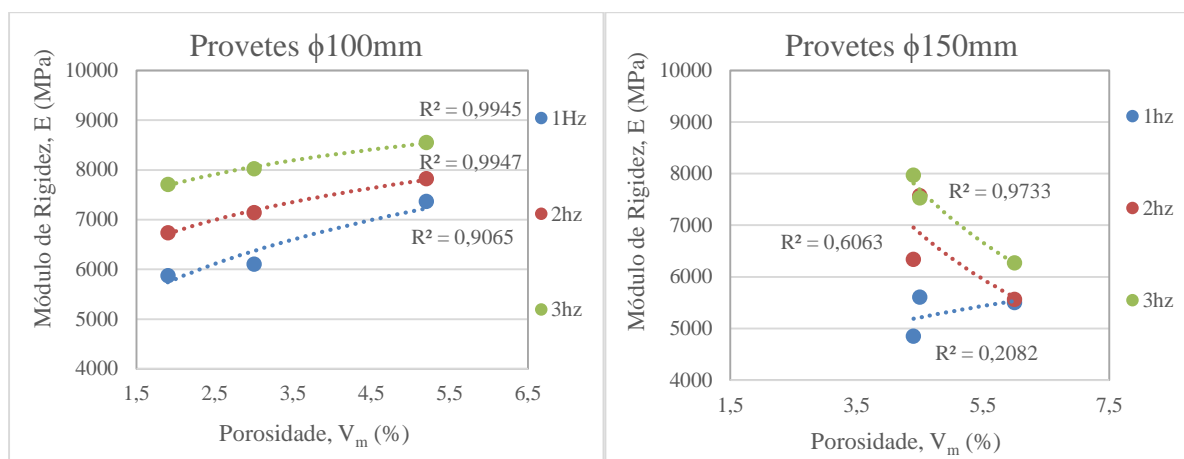


Figura 4.22 Variação do módulo de rigidez de acordo com a porosidade para provetes de 100mm de diâmetro (à esquerda) e provetes de 150mm de diâmetro (à direita)

De forma a ter uma compreensão mais alargada da variação dos valores do módulo com a porosidade traçou-se o gráfico da Figura 4.23, na qual se juntaram os valores representados nos dois gráficos anteriores. É possível verificar para as frequências de 2Hz e 3Hz que o módulo de rigidez assume um valor máximo próximo da porosidade de 3,5%. Ressalva-se que estas tendências não são generalizáveis, quer porque os coeficientes de determinação são baixos, quer porque as tensões instaladas nos provetes de diâmetros diferentes não são da mesma magnitude.

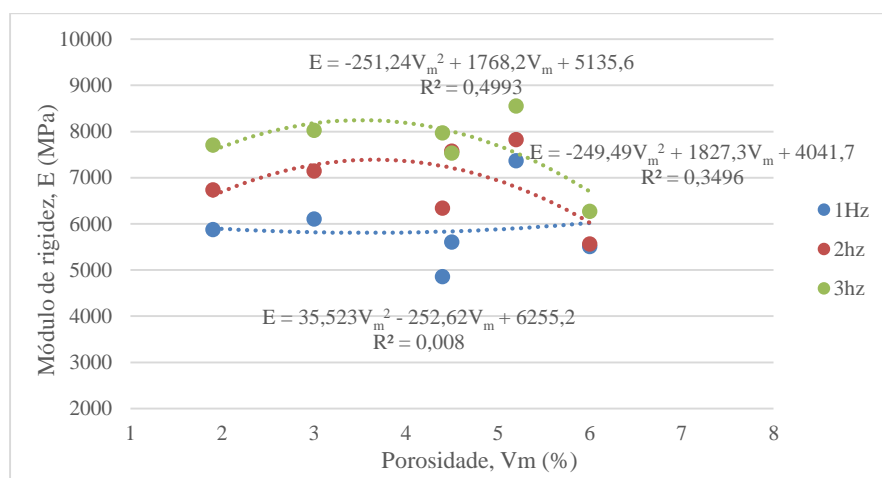


Figura 4.23 Representação gráfica da variação do módulo de rigidez, para os provetes de 100m e 150mm de diâmetro, conforme a porosidade

Para avaliar a dispersão dos resultados obtidos, calculou-se o coeficiente de variação como medida de dispersão. Como mostra o Quadro 4.20, os valores obtidos para CV são altos, geralmente acima de 12%. Para os provetes de 150mm de diâmetro o CV é ligeiramente mais baixo mas o número de ensaios realizado não é suficientemente grande para que os resultados sejam generalizáveis.

Quadro 4.20 Medidas de dispersão dos resultados dos módulos de rigidez obtidos

Betume (%)	Frequência (Hz)	Provetes $\phi 100\text{mm}$				Provetes $\phi 150\text{mm}$			
		Módulo médio (MPa)	Nº de provetes	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	Módulo médio (MPa)	Nº de provetes	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
6	1	7369	7	1012	13,7	5505	2	454	8,2
	2	7824	7	1461	18,7	5565	2	488	8,8
	3	8554	7	1912	22,4	6274	2	627	10,0
6,5	1	6105	6	789	12,9	4854	2	722	14,9
	2	7142	6	780	10,9	6337	2	286	4,5
	3	8026	6	1182	14,7	7970	2	486	6,1
7	1	5874	7	371	6,3	5605	2	1458	26,0
	2	6738	7	828	12,3	7571	1	0	0,0
	3	7707	7	1130	14,7	7530	2	243	3,2

➤ **Análise comparativa de resultados – Método de Previsão da *Shell*, ensaio 4PB e resultados obtidos noutros estudos**

Comparam-se também os resultados obtidos no ensaio de avaliação do módulo de rigidez por tração indireta IT-CY, em provetes de 100 mm de diâmetro, com os medidos no ensaio de flexão em 4 pontos, 4PB-PR, e com os resultados obtidos por Gardete (Gardete, 2016) para uma SMA 12,5 a quente, também eles em 4PB-PR. Além disso, a comparação inclui os valores previstos para o módulo de rigidez pelas expressões de previsão da *Shell*, para uma mistura semelhante à SMA com MBR ensaiada. Esta comparação foi elaborada com base no gráfico representado na Figura 4.24, para três frequências de carregamento representativas. Foi ainda feita uma comparação com outros ensaios IT-CY, patente na Figura 4.25, de vários autores, com base nos pressupostos da norma EN 12697-26.

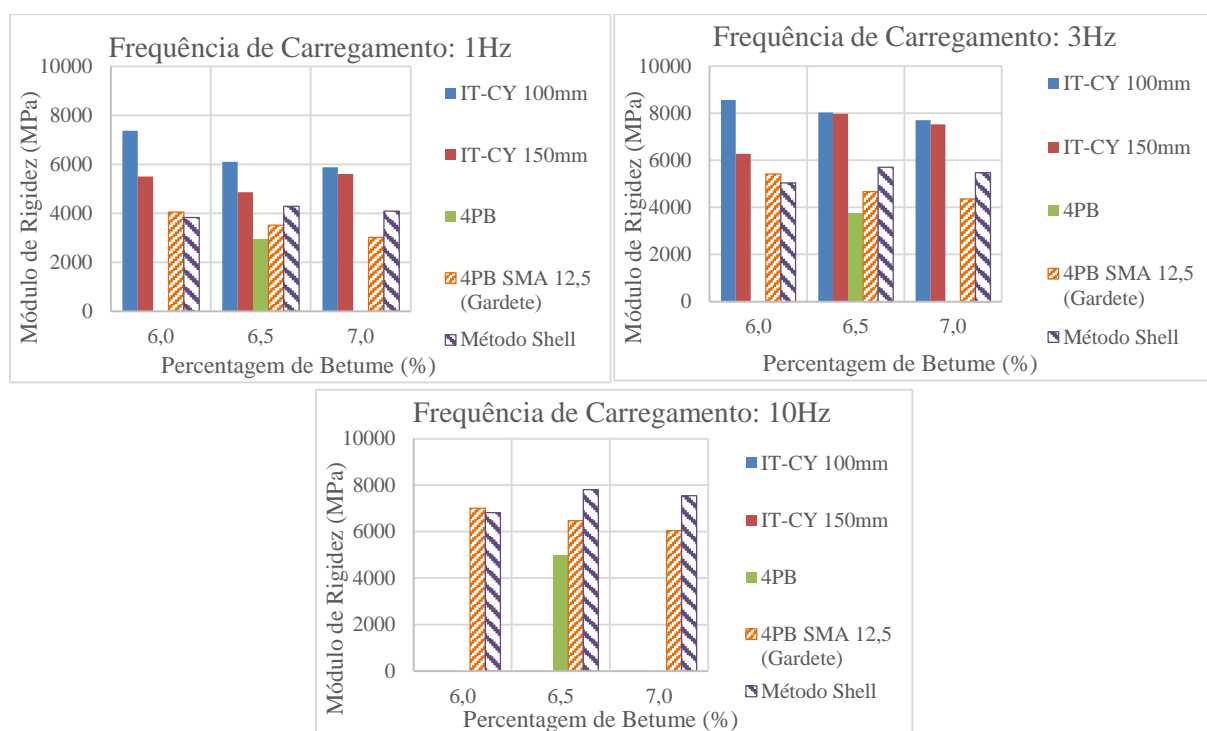


Figura 4.24 Estudo comparativo de módulos de rigidez, a 20°C

Como se pode verificar, os valores dos módulos obtidos para o ensaio de tração indireta são substancialmente maiores do que os valores obtidos pelos ensaios de flexão em 4 pontos para a SMA em estudo. Razões relacionadas com o estado de tensão do material durante o ensaio, a porosidade e a estrutura do esqueleto do agregado nos vários tipos de provetes podem explicar as diferenças observadas.

A comparação dos resultados com os valores obtidos pelo método de previsão da *Shell* (Claesen et al, 1977), permite concluir que os módulos obtidos em ensaios IT-CY são bastante elevados, embora os valores obtidos através do Método Shell sejam maiores que os determinados para o ensaio de 4PB-PR. No entanto, o Método Shell foi desenvolvido com base em resultados experimentais para misturas densas e abertas, geralmente diferentes da SMA estudada, pelo que a previsão pode não reproduzir suficientemente bem a real deformabilidade da mistura em estudo.

No que concerne à comparação de resultados obtidos em vários estudos de misturas ensaiadas em tração indireta, (IT-CY), foram escolhidos os trabalhos de Pesetto (Pesetto et al, 2011) e Tóth Mba (Tóth Mba et al, 2015). Estes trabalhos referem-se, respetivamente, a SMA 14 com ou sem resíduos, neste caso escórias de aço, e betão betuminoso AC 11. Para consulta detalhada das características das misturas comparadas e parâmetros de ensaio ver Quadro II.20 do APÊNDICE II.

Através da leitura do gráfico da Figura 4.25, confirma-se, mais uma vez, que os valores do módulo de rigidez, no caso da mistura de 6,5% em estudo, são bastante elevados. Poderá se

especular-se que este facto poderá derivar do contributo, para a rigidez, do betume envelhecido da MBR adicionada e da adição de fibras.

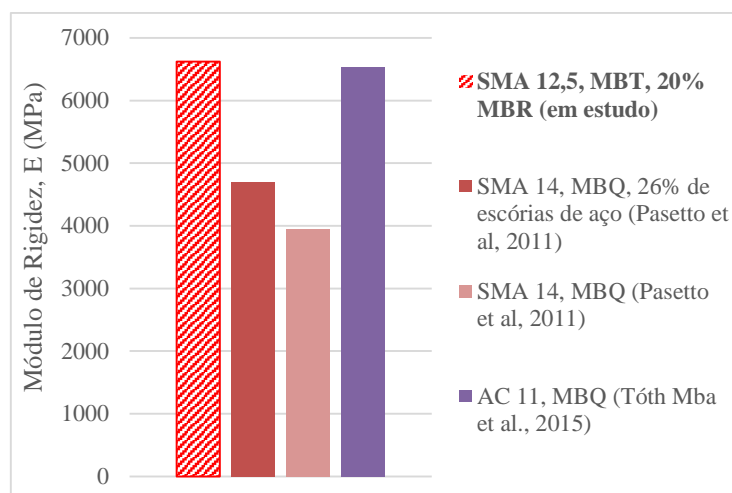


Figura 4.25 Gráfico comparativo entre misturas ensaiadas à tração indireta por compressão diametral (IT-CY) segundo a norma EN 12697-26

4.5.5 Avaliação da resistência ao fendilhamento através do Método de previsão da Shell

Numa análise mecanicista de uma mistura, geralmente o último dos ensaios a efetuar é o ensaio de avaliação da resistência à fadiga. Nesta dissertação não se apresentam resultados de ensaios desse tipo. Contudo, foram envidados esforços na tentativa de ensaiar provetes cilíndricos à fadiga, através do ensaio de tração indireta por compressão diametral (IT-CY), seguindo um modo operativo próximo do da avaliação do módulo de rigidez, mas aplicando tensões mais elevadas em forma de onda sinusoidal. No entanto, e apesar de terem sido feitas modificações nos transdutores de deslocamento, não foi possível obter resultados fidedignos por limitações do equipamento.

Apesar disto, optou-se por fazer uma previsão da resistência ao fendilhamento por fadiga, através do Método da *Shell* (Claessen et al., 1997), um pouco à imagem do que já se fez anteriormente para os módulos de rigidez.

Para isso, foram estabelecidas as leis de fadiga com base nos módulos de rigidez determinados experimentalmente, para os provetes ensaiados em 4PB-PR (grupo 6,5% de betume) e IT-CY (grupos 6%, 6,5% e 7% de betume). Também se incluíram as leis de fadiga para módulos determinados através do método da *Shell*, para os mesmos grupos. Para os provetes testados em 4PB-PR utilizou-se a frequência de 10 Hz e para os provetes testados em IT-CY utilizou-se a frequência de 3 Hz.

A lei de fadiga determinada para o Método da *Shell*, apresentada na Equação 4.10, determina a extensão (ϵ_t) em função da percentagem volumétrica de betume (V_b), do módulo de rigidez (S_m) e do número de repetições de carga (N_{80} caso se considere que as cargas são de um eixo padrão de 80 kN).

(4.10)

$$\varepsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times S_m^{-0,36} \times N_{80}^{-0,2}$$

Onde:

ε_t – extensão de tração ($\mu\varepsilon$ – adimensional);

N – número de eixo padrão de 80 kN;

V_b – percentagem volumétrica de betume no volume total (%);

S_m – Módulo de rigidez da mistura betuminosa (Pa).

Neste caso foram impostas extensões de 100, 150 e 200 $\mu\varepsilon$, de forma a obter o número de eixos padrão admissível para aqueles níveis de deformação. Pode verificar-se no Quadro 4.21, os valores de N_{80} calculados.

Quadro 4.21 Quadro resumo de parâmetros a aplicar na lei de fadiga da Shell e N_{80} calculados a partir das deformações impostas

Lei de fadiga			Shell 3 Hz	Shell 10 Hz	4PB-PR, 6,5%, 10 Hz	IT-CY, 6%, 3 Hz	IT-CY, 6,5%, 3 Hz	IT-CY, 7%, 3 Hz
Mód. Rigidez, S_m , a 20°C (MPa)			5761	7879	5001	8554	8026	7707
V_b (%)			13,86	13,86	13,94	12,65	13,95	14,97
ε_t ($\mu\varepsilon$)	100	N_{80}	98049469	55809221	129894652	16933006	55698138	82786510
	200		3064046	1744038	4059208	529156	1740567	2587078
	300		403496	229668	534546	69683	229210	340685

Com base nos valores de deslocamento e número de eixos padrão, traçaram-se as leis de fadiga, representadas no gráfico da Figura 4.26.

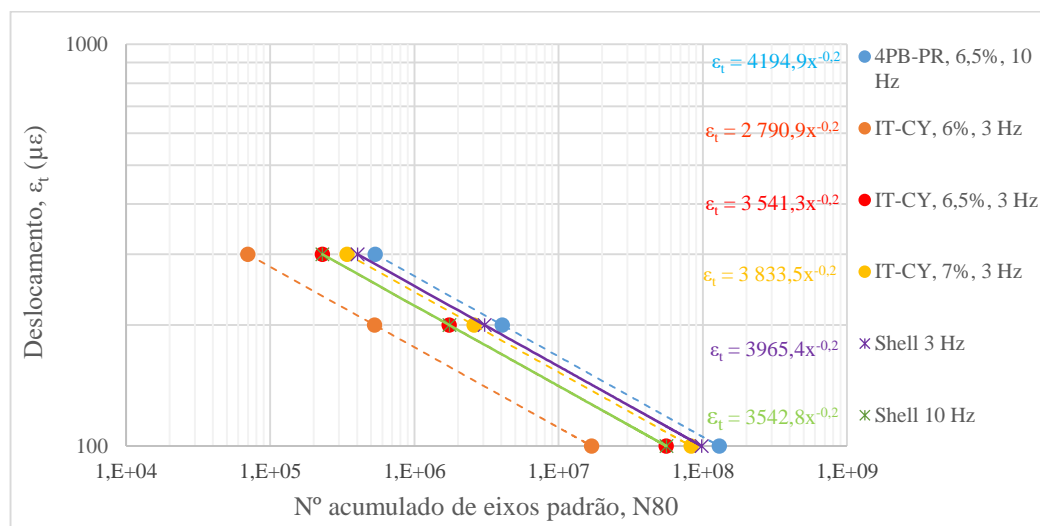


Figura 4.26 Leis de Fadiga Shell

Após a determinação das leis de fadiga graficamente, procedeu-se ao cálculo da deformação necessária para levar à ruína no ciclo 10^6 , denominada ϵ_6 , cujos valores podem ser consultados no Quadro 4.22. Valores mais elevados de ϵ_6 significam maior resistência à fadiga.

Através da consulta dos valores de ϵ_6 pode verificar-se que, para a frequência de 10 Hz, a previsão feita através do módulo de rigidez obtido experimentalmente é menos gravosa que a previsão feita através da sua determinação pelo método da Shell. No sentido inverso, para a frequência de 3 Hz, o melhor comportamento à fadiga é dado pelos módulos determinados pela expressão da Shell.

No entanto, há que ter em consideração que este modelo de previsão poderá não estar ajustado a misturas do tipo SMA, pelo que a previsão que este nos dá pode não ser totalmente confiável.

Quadro 4.22 Leis de fadiga e cálculo de ϵ_6

Designação	Lei de fadiga	ϵ_6 (με)
4PB-PR, 6,5%, 10 Hz	$\epsilon_t = 4194,9 \cdot N^{-0,2}$	265
IT-CY, 6%, 3 Hz	$\epsilon_t = 2790,9 \cdot N^{-0,2}$	176
IT-CY, 6,5%, 3 Hz	$\epsilon_t = 3541,3 \cdot N^{-0,2}$	223
IT-CY, 7%, 3 Hz	$\epsilon_t = 3833,5 \cdot N^{-0,2}$	242
Shell 3 Hz	$\epsilon_t = 3965,4 \cdot N^{-0,2}$	250
Shell 10 Hz	$\epsilon_t = 3542,8 \cdot N^{-0,2}$	224

4.6 Considerações Finais

No geral a mistura estudada apresenta bom comportamento. As características de durabilidade estão garantidas, de acordo com o bom resultado do ensaio de sensibilidade à água, que poderá ser justificado com a elevada percentagem de betume da mistura.

Para os valores de estabilidade e deformação Marshall, a mistura apresenta, para a primeira, valores baixos, próximos do limite inferior da gama de valores habitualmente aceites para misturas do tipo betão betuminoso e, para a segunda, valores bastante elevados face aos resultados típicos de um AC. No entanto, o ensaio de Marshall não é particularmente adequado para avaliar as misturas do tipo SMA, uma vez que os valores de deformação elevados induzem a ideia de que estas misturas poderão ter um mau desempenho à deformação permanente, o que geralmente não se verifica.

Quanto à resistência à deformação permanente, a SMA com MBR estudada evidencia um bom comportamento, como seria de esperar, verificando-se que o grupo de percentagem de betume de 6,5%, é aquele que melhor desempenho tem. Foi verificado ainda que é entre as percentagens de porosidade 4% e 4,5% que se verifica que as misturas tem melhor comportamento à deformação permanente. No entanto, dada a elevada porosidade obtida para os provetes com 6%, estes evidenciaram menor resistência à deformação permanente que as amostras mais ricas em betume, o que não acontece habitualmente.

Os resultados do módulo de rigidez em compressão diametral IT-CY foram bastante elevados, especialmente para uma mistura de granulometria descontínua e bastante rica em ligante. Os ensaio de flexão 4PB-PR realizados complementarmente, mostraram que os módulos obtidos são satisfatórios, embora bastante mais baixos que os obtidos nos ensaios de compressão diametral. Julga-se que o método de ensaio, o nível e o estado de tensão nos provetes, bem como a estrutura do esqueleto da mistura (associada ao método de compactação) sejam os principais responsáveis pelas diferenças verificadas.

Embora sem realizar ensaios, a análise efetuada relativamente à capacidade da SMA em estudo para resistir à fadiga, com base na lei da Shell e utilizando alguns parâmetros medidos experimentalmente da SMA em estudo, deu boas indicações em relação ao comportamento esperado.

5 CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Síntese do Trabalho e Conclusões Gerais

Neste trabalho procurou-se contribuir para a caracterização de uma mistura betuminosa, do tipo SMA com MBR, temperada, a qual apresenta características peculiares face ao que é habitual nas obras rodoviárias.

O estudo iniciou-se na recolha de elementos disponíveis na literatura, nomeadamente sobre as diversas tecnologias de MBT, sobre estudos de incorporação de MBR nas misturas betuminosas e sobre as características típicas de uma mistura do tipo SMA.

Nos trabalhos laboratoriais foi feita uma caracterização volumétrica da mistura e foi seguido o método de formulação *Marshall*, amplamente divulgado no nosso país e na Europa.

Devido às limitações deste método de formulação para formulação de SMA, os trabalhos prosseguiram com a análise de escoamento do betume na mistura (Ensaio de *Shellenberg*), avaliação da sensibilidade à água, resistência à deformação permanente e a medição do módulo de rigidez.

De acordo com a pesquisa bibliográfica efetuada e com os resultados obtidos em laboratório, apresentam-se elencadas, de seguida as conclusões gerais deste trabalho.

- A produção de MBT com MBR não precisa de grandes adaptações em central, sendo os métodos de aplicação em obra iguais aos das misturas tradicionais. Pequenas alterações poderão ter que ser feitas de acordo com a tecnologia de diminuição da temperatura, e se a MBR tiver de ser introduzida em duas frações, dada a natureza descontínua das SMA (como é o caso da mistura estudada neste trabalho);
- As MBT apresentam um número significativo de benefícios, em comparação com as MBQ, associados essencialmente à economia de energia, o que conduz a uma redução significativa das emissões de gases de efeito de estufa e poluentes;
- São apontadas também algumas desvantagens, como por exemplo, os custos dos aditivos e fibras, a possível redução na resistência à deformação permanente e as dúvidas sobre a sua durabilidade. Estas desvantagens poderão ser compensadas com a o bom comportamento à deformação permanente das misturas SMA e da sua relativamente longa vida útil;
- As MBT podem beneficiar da adição de MBR, no que toca ao aumento da rigidez do betume e consequente melhoria do comportamento à deformação permanente;

- No que respeita aos limites especificados para a granulometria de um SMA pela norma europeia, conclui-se que aqueles pontos de controlo não garantem, só por si, uma granulometria suficientemente descontínua;
- As propriedades volumétricas obtidas estão dentro do geralmente esperado para misturas do tipo SMA, de acordo com algumas orientações de especificações consideradas como referência;
- Para o ensaio de escorrimento, exigido para misturas de granulometria descontínua do tipo SMA, os resultados obtidos são bastante satisfatórios, confirmando também a correta dosagem de fibras na mistura;
- Pode-se constatar que a incorporação de MBR e a utilização de aditivos para redução da temperatura não influenciou negativamente as propriedades volumétricas da mistura;
- Os resultados de estabilidade Marshall obtidos não foram satisfatórios, tendo valores de força na rotura muito baixos e deformações altas. No entanto, de acordo com a literatura, este ensaio não permite, só por si, estudar de forma adequada misturas do tipo SMA, uma vez que os critérios utilizados para as misturas do tipo betão betuminoso não são integralmente aplicáveis a SMA;
- A utilização de uma metodologia de avaliação empírico-mecanicista é a abordagem mais correta para a caracterização de misturas temperadas, do tipo SMA com MBR;
- Os resultados dos ensaios de avaliação da resistência à deformação permanente são bastante satisfatórios. No entanto, verificou-se uma deformação excessiva por parte da mistura de 6% de betume, muito por força da sua maior porosidade face às restantes composições;
- Os resultados mais satisfatórios do ensaio à resistência permanente verificam-se para os provetes com porosidade de 4%, o que corrobora a escolha desta na Formulação *Marshall*;
- Os ensaios de avaliação do módulo de rigidez por tração indireta IT-CY, apresentaram valores bastante elevados, explicados pela adição de aditivo e pela percentagem de incorporação de MBR com betume envelhecido, no entanto o ensaio de 4PB (ensaio de controlo) não confirma esta tendência. Para uma mistura de granulometria descontínua, de fato, estes valores parecem ser excessivos;
- Verificou-se que diferentes métodos de compactação para mesma mistura induzem valores de porosidade, VMA e VFB diferentes entre si, o que poderá conduzir a valores díspares entre os diferentes ensaios de avaliação do módulo de rigidez, pelo que, estes poderão não ser comparáveis;
- Diferentes ensaios de avaliação do módulo de rigidez, também poderão não ser comparáveis entre si devido a diferentes estados de tensão induzidos;

- Os resultados do módulo de rigidez para provetes de 150mm de diâmetro, não podem ser considerados, pois as tendências normais não se confirmam;
- Os ensaios de desempenho mecânico demonstram que a mistura em estudo tem uma melhor performance para percentagens de betume próximas da percentagem ótima de betume *Marshall*, embora a formulação Marshall não seja suficiente para caracterizar misturas do tipo SMA;
- Os ensaios de desempenho mecânico mostram que porosidades entre 3,5% e 4,5% são as que mais se adequam a estas misturas;
- Não foi possível verificar experimentalmente se o método de previsão da resistência à fadiga da *Shell* se adequa para este tipo de misturas, mas a análise efetuada deu boas indicações relativamente à capacidade da SMA com MBR resistir à fadiga;
- Verificou-se que a previsão do módulo de rigidez pelas expressões da Shell resultou em valores intermédios entre os determinados nos ensaios de IT-CY e nos ensaios de 4PB-PR;
- Embora as misturas do tipo SMA envolvam dificuldades adicionais na conceção da mistura de agregados, e a incorporação de MBR acarrete problemas adicionais, pode concluir-se que, do ponto de vista das propriedades medidas em laboratório, a utilização de SMA temperadas, com incorporação de MBR, é possível, e que a performance esperada é semelhante à que se obtém para misturas do tipo SMA produzidas a quente e sem MBR.

5.2 Prosseguimento de Trabalhos Futuros

A presente dissertação consistiu numa primeira abordagem da avaliação do desempenho mecânica de SMA temperadas, com incorporação de MBR. Assim, justifica-se o prosseguimento dos estudos de modo a avaliar de forma mais desenvolvida as possibilidades que esta tecnologia poderá permitir.

Recomenda-se uma análise mais extensa da resistência à deformação permanente, como o aumento do número de provetes e a realização de outros ensaios, como seja o ensaio de *Wheel Tracking* ou ensaio triaxial. Recomenda-se ainda uma verificação dos resultados para percentagens relativamente mais baixas de betume, uma vez que os provetes com 6% de ligante apresentaram um desempenho relativamente pior que os restantes.

Deverá ainda ser elaborado um programa de ensaios de flexão em 4 pontos mais extenso e um aumento do número de provetes ensaiados à tração indireta, no sentido de avaliar o módulo de deformabilidade para mais condições de ensaio e para mais composições diferentes, variando, por exemplo, a percentagem de MBR.

Para além disso, deverão ser realizados ensaios à fadiga, com 4PB-PR, de forma a ter uma perspetiva do desempenho medido experimentalmente.

Será ainda de interesse a realização de trechos experimentais, de modo a observar o comportamento deste tipo de misturas quando sujeitas a condições de solicitação reais, relacionando posteriormente o seu comportamento com valores obtidos em laboratório. Esta correlação permitirá contribuir para ajustar os valores limites de ensaio para aceitação deste tipo de mistura.

5.3 Considerações Finais

Finalmente, tendo em conta os conhecimentos adquiridos durante o estudo efetuado e os resultados alcançados, pode considerar-se que os objetivos propostos foram atingidos. Numa primeira fase foi realizada uma síntese sobre o estado da arte de MBT e foram descritos os aspetos mais importantes associados à incorporação de MBR em novas misturas. Numa segunda fase foi realizada uma revisão bibliográfica sobre misturas do tipo SMA.

Além destas revisões bibliográficas, que permitiram uma síntese de conhecimentos sobre estes temas, recorreu-se a trabalhos experimentais que permitiram obter alguns resultados relevantes acerca do comportamento de MBT, do tipo SMA com incorporação de MBR e fibras celulósicas. Embora muito haja por investigar neste âmbito, pode-se concluir que estas misturas têm potencial para futuramente constituir uma alternativa válida às misturas tradicionais.

A presente dissertação pretende também contribuir, mesmo que de forma modesta, para o aumento do interesse de futuros trabalhos nesta área, assim como para a inclusão de critérios ambientais e de promoção da sustentabilidade no desenvolvimento de “novas” misturas betuminosas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, C. (2009). "Caracterização do desempenho de um Stone Mastic Asphalt". Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.

Antunes, D. (2014). "Misturas Betuminosas Temperadas, do tipo SMA, com Incorporação de Material Betuminoso Reciclado e Fibras Celulósicas – Contribuição para a sua Caracterização" Tese de Mestrado. Portugal: Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra

Batista, F., Miranda, H., Antunes, M. L., Lanchas, S., Martinho, F. (2012). Apresentações T4 – "Aplicações de Misturas Betuminosas de Elevado Desempenho em Redes Viárias Urbanas". Jornadas LNEC – Engenharia para a Sociedade. Investigação e Inovação. Cidades e Desenvolvimento. Apresentações Posters/T4. LNEC. Lisboa 18-20 de Junho de 2012. http://jornadas2012.lnec.pt/site_2_Cidades_e_Developimento/APRESENTACOES_POSTERS/T4_BATISTA_a115.pdf (consultado em novembro de 2016).

Baptista, A. (2006). "Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central – Contribuição para o seu estudo e aplicação". Dissertação para obtenção do Grau de Doutor. Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.

Blażejowski, K. (2011). "Stone Matrix Asphalt – Theory and Practice." CRC Press-Taylor e Francis Group.

Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L. (2008). "Pavimentos Rodoviários", Edições Almedina (ISBN 978-972-40-2648-0), Coimbra.

Brown, E.R e Manglorkar, H., (1993) "Evaluation of Laboratory properties of SMA mixtures", Relatório de Pesquisa.

Buchanan, S. (2007) "Resilient Modulus: What, Why, And How?". Vulcan Materials Comapny

Button, J.; Estakhri, C. e Wimsatt, A. (2007) "A Synthesis of Warm-mix Asphalt". Report FHWA/TX-07/0-5597-1. Texas, USA : Texas Transportation Institute.

Capitão, S.; Picado-Santos, L. e Martinho, F. (2012) "Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt". s.l. : Construction and Building Materials.

Chowdhury, A., Button, J.W. (2008). "A review of warm mix asphalt". Texas A&M University System.

Claessen, A., Edwards, J., Sommer, P., Ugé, P. (1977) “Asphalt pavement design – The Shell method”, Proceedings of the 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, The University of Michigan, Michigan, pp. 39-74.

D’Angelo, J.; Harm, E.; Bartoszek, J.; Baumgardner, G.; Corrigan, M.; Cowser, J. (2008). “Warm-mix Asphalt: European Practice”. Report no. FHWA PL-08-007. Alexandria : FHWA, AASHTO, NCHRP, 2008.

Drüschner, L., Schäfer, V. (2000) “Stone Mastic Asphalt”, German Asphalt Association.

EAPA. (2010). “The Use of Warm Mix Asphalt – EAPA position paper”. Brussels: EAPA - European Asphalt Pavement Association.

EAPA (2015). EAPA Website: <http://www.eapa.org/promo.php?c=202> (consultado em junho de 2015).

EP (2012). “Caderno de Encargos Tipo Obra”, Estradas de Portugal, Almada

Ferreira, C. (2009). “Avaliação do desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas”. Tese de Mestrado. Portugal: Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães.

FHWA (2008). “Warm Mix Asphalt Technologies and Research”. Federal Highway Administration. U.S. DoT.

Gardete, D. (2016). “Contribuição para o estabelecimento duma mistura betuminosa adequada para o ciclo de vida através da definição na fase de formulação duma parametrização eficiente”. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Gardete, D., Picado – Santos, L. e Capitão, S. (2011). “Formulação Volumétrica e Desempenho de Misturas Betuminosas Stone Mastic Asphalt”. XVI CILA – Congresso Ibero – Latinoamericano do Asfalto, 20-25 Novembro, 2011 – Rio de Janeiro - Brasil.

Harrison, T., and L. Christodoulaki. (2000) “Innovative Processes in Asphalt Production and Application—Strengthening Asphalt’s Position in Helping to Build a Better World,” Proceedings, First International Conference, World of Asphalt Pavements, Australian Asphalt Pavement Association, Kew, Victoria, Australia.

Highway1 (2016). Highway1. Website: <http://www.highway1.co.nz/sma-fibres.html> (consultado a dezembro de 2016)

Hurley, G.C., Prowell, B.D. (2008). “Warm Mix Asphalt: Best Practices”. National Asphalt Pavement Association. 53rd Annual Meeting.

Hurley, G.C., Prowell, B.D. (2005). “Evaluation of Evotherm® for use in Warm mix asphalt”. National Center for Asphalt Technology.

InIR. (2009). “Ensaio de Comparação Interlaboratorial para Avaliação da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas Compactadas”. Instituto de Infra - Estruturas Rodoviárias. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

- Jenkins, K.J., J.L.A. de Groot, M.F.C. van de Ven, and A.A.A. Molenaar. (1999)** “Half-Warm Foamed Bitumen Treatment, a New Process,” 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA), Victoria Falls, South Africa.
- Jullien, A.; Baudru, Y.; Tamagny, P.; Olard, F.; Zavan, D. (2011).** “A comparison of environmental impacts of hot and warm mix asphalt”. Routes Roads 350. p. 81–85. s.l. : PIARC (World Road Association).
- JRS (2015).** JRS Website:
http://www.jrs.eu/jrs_wAssets/docs/strassenbau/produktflyer/en/viatop-plus-ct-40-productflyer.pdf (consultado em junho 2015)
- Kristjánisdóttir, Ó., Muench, S.T., Michal, L., Blurke, G. (2007).** “Assessing Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption”. Transportation Research Record, No. 2040. Transportation Research Board.
- Kuennen, T. (2004)** “Warm Mixes are a Hot Topic,” Better Roads, James Informational Media, Inc., Des Plaines, Illinois.
- Maccarrone, S., Holleran, G., Ky, A. (1994).** “Cold Asphalt Systems as an Alternative to Hot Mix”. 9th AAPA International Asphalt Conference.
- Martinho, F. (2014).** “Misturas Temperadas com Subprodutos Industriais – Caracterização e Validação Tecnológica”. Tese de Doutorado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Martinho, F., Lanchas, S., Nunez, R., Batista, F., Miranda, H. (2013).** “A Experiência Portuguesa em Misturas Betuminosas do Tipo SMA com Fibras Celulósicas”. http://www.crp.pt/docs/A45S145-27_Art_T4_7CRP_2013.pdf (consultado em abril 2014)
- Mounes, S.; Karim, M., Khodaii, A. (2015).** “Evaluation of permanent deformation of geogrid reinforced asphalt concrete using dynamic creep test”. Geotextiles and Geomembranes 44 109-116
- Nunn, M.E. (1994),** “Evaluation of Stone Mastic Asphalt (SMA): A HighStability Wearing Course Material”, Transport Research Laboratory Project Report 65
- Nynas (2009).** “Asfalto templado, semi-templado y frío: el caso a favor de la sostenibilidad”. Nynas Bitumen Magazine: Performance, issue 1.
- Pesetto, M.; Baldo, N. (2012)** “Performance comparative analysis of stone mastic asphalts with electric arc furnace steel slag: a laboratory evaluation”. Materials and Structures. 45:411-424
- Proclima. (2016)** Proclima website: <http://proclima.cetesb.sp.gov.br/conferencias/a-convencao-sobre-mudancas-climaticas/> (consultado em setembro de 2016)
- Prowell, B, Watson D., Hurley G., Brown, E. (2009).** “Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) for Airfields Pavements”. AAPTP 04-04 Final Report, National Center for Asphalt Technology, Auburn University.

Prowell, B.; Hurley, G. e Frank, B. (2011). “Warm-Mix Asphalt: Best Practices”. 2nd Edition. Lanham, MD - USA : National Asphalt Pavement Association (NAPA).

Prowell, B., Watson, D., Hurley, G., Brown, E. (2009). “Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) for airfield pavements”, AAPT 04-04, Final Report, Prepared for Airfield Asphalt Pavement Technology Program Auburn University.

Rashwan, Mohamed Hamada. (2012). “Characterization of Warm Mix Asphalt (WMA) performance in different asphalt applications” [PhD Thesis]. Iowa, USA : Iowa State University.

Ruhl, R., Liendemeier, B. (2006). “Progress Report 2006 - The German Bitumen Forum”. The Germany Bitumen Forum. Issue 2, Heurich Lanck GmbH, Germany.

Sabita. (2011). “Best Practice Guideline for Warm Mix Asphalt”. África do Sul : s.n..

Sasol (2004). “The Bitumen Additive for Highly Stable Easily Compactable Asphalts”. Sasobit® Product Information 124, Sasol Wax GmbH, Hamburg.

Sasol (2008). “Sasobit Technology”. Sasol Wax GmbH Company, Hamburg. http://www.sasolwax.com/Sasobit_Technology.html (consultado a novembro de 2015)

Shu, Xiang; Huang, Baoshan; Shrum, Emily; Jia, Xiaoyang. (2012). “Laboratory evaluation of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt containing high percentages of RAP”. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.095> : Construction and Building Materials Journal, 2012.

Silva, P. (2005), “Estudo em laboratório e em campo de misturas asfálticas SMA 0/8S”, Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo, Brasil

Shell (2005), “Bridge Decks Solutions”, Apresentação, Hanoi, Vietname

Solaimanian, Mansour; Milander, Scott; Boz, Ilker; Stoffels, Shelley M. (2011). “Development of Guidelines for Usage of High Percent RAP in Warm-Mix Asphalt Pavements”. Report. . Pennsylvania, EUA: Thomas D. Larson Pennsylvania Transportation Institute, [2011. 2013], 2013.

Tóth Mba, C.; Soós, Z. (2015). “The effect of VIATOP® plus FEP on the stiffness and low temperature behaviour of hot mix asphalts”. Journal of Silicate Based and Composite Materials. Vol. 67 N° 4

UN (1986). “Bituminous pavements: materials, design and evaluation”, Lecture Notes of a residential Course in University of Nottingham, University of Nottingham, Nottingham.

Van der Poel, C. (1954). “A general system describing the visco-elastic properties of bitumen and its relation to routine test data”. Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, pp. 221-236.

Vargas-Nordbeck, (2007). “Evaluation of the use of Reclaimed Asphalt Pavements in Stone Matrix Asphalt Mixtures”. Master of Science Thesis, Auburn University.

Yan, J; Ni, F; Yang, M; Li, J; (2010). “An experimental study on fatigue properties of emulsion and foam cold recycled mixes”. Construction and Building Materials Journal, 2010.

Zaumanis, M. (2010). “Warm Mix Asphalt Investigation” [Master of Science Thesis]. Kgs. Lyngby, Denmark : Technical University of Denmark (Department of Civil Engineering) & Riga Technical University (Faculty of Civil Engineering Institute of Transportation) in cooperation with the Danish Road Institute, 2010.

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

AASHTO M-325: 2008, Standard Specification for Stone Matrix Asphalt (SMA). American Association of State Highway and Transportation Officials.

NP EN 933-1: 2012, Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 1097-6: 2003+A1: 2010, Determinação da massa volúmica e da absorção de água. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

EN 12697-2: 2002+2010, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 2: Determination of particle size distribution. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-5: 2009, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 5: Determination of the maximum density. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-6: 2012, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-8: 2003, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 8: Determination of the void characteristics of bituminous specimens. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-12: 2008, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-18: 2004, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 18: Binder drainage. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-22: 2003 + A1: 2007, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel-Tracking. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-23: 2003, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-26: 2012, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-30: 2012, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 30: Specimen preparation, impact compactor. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-33: 2003+ A1:2007, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-34: 2012, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 34: Marshall test. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-35: 2004+2007, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 35: Laboratory mixing. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-39: 2012, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 39: Binder content by ignition. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 13108-5: 2006, Bituminous mixtures – Material specifications. Part 5: Stone Mastic Asphalt. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

NP EN 13043: 2013, Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 13108-1:2011, Misturas betuminosas – Especificações dos materiais. Parte 1: Betão Betuminoso. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

APÊNDICES

APÊNDICE I. Estudo da Mistura betuminosa

➤ Estudo da mistura betuminosa – Formulação Marshall

Quadro I.1 Composição dos provetes Marshall

Grupo de Provetes	Betume (%)	Massa de Betume Novo (g)	4/16 (%)	Massa 4/16 (g)	4/16 (%)	Massa 0/4 (g)	Fíler (%)	Massa Fíler (g)	MBR 0/8 (%)	Massa MBR 0/8 (g)	MBR 8/16 (%)	Massa MBR 8/16 (g)	Total
2	6	59,3	62	698	10	112,6	8	90,1	8	96	12	144	1200
3	6,5	65,3		693,4		111,8		89,5		96		144	1200
4	7	71,3		688,7		111,1		88,9		96		144	1200
Subtotal (g)		196		2080,1		335,5		268,4		288		432	3600
Total (g)*		783,9		8320,4		1342		1073,6		1152		1728	14400

* Para cada grupo foram fabricadas quatro amostras

Quadro I.2 Massas volúmicas dos materiais utilizados na mistura

Massas Volúmicas	
Fração	prd (g/cm ³)
Brita 4/12,5	2,6
Pó 0/4	2,62
Fíler	2,7
Agregado da MBR fração 0/8 mm	2,57
Agregado da MBR fração 8/16 mm	2,558
Betume	1,03

➤ **Estudo da mistura betuminosa – Propriedades Volumétricas**

Quadro I.3 Cálculo da baridade dos provetes Marshall

Provete	Betume (%)	Altura Média (mm)	Pesado ao ar	Selado Com Parafina	Imerso em Água	Temp. Água (°C)	Densidade da Água (kg/m³)	Baridade (kg/m³)	Baridade Média (kg/m³)
2.1	6,00	63,1	1130,5	1154,1	635,9	24	997,4	2295	2275
2.2	6,00	66,6	1153,2	1183,8	641,2	24	997,4	2265	
2.3	6,00	66,6	1165,3	1206,2	649,8	24	997,4	2280	
2.4	6,00	66,1	1154,1	1184,8	640,5	24	997,4	2260	
3.1	6,50	66,6	1169,8	1201,9	654,9	25	997,1	2285	2282
3.2	6,50	61,7	1110,5	1146,5	622,2	25	997,1	2291	
3.3	6,50	62,7	1090,3	1121,6	605,9	25	997,1	2265	
3.4	6,50	59,8	1057,3	1094	591,3	25	997,1	2287	
4.1	7,00	62,6	1119,6	1150,4	632,2	25	997,1	2311	2302
4.2	7,00	65,6	1147,7	1184,7	641,6	25	997,1	2284	
4.3	7,00	66,6	1181,1	1218,6	662,3	25	997,1	2293	
4.4	7,00	63,4	1160,4	1191,7	656,9	25	997,1	2318	

Quadro I.4 Cálculo da baridade, da baridade máxima teórica, da porosidade, do VMA e do VFB dos provetes Marshall

Provete	Betume (%)	Baridade Máxima Teórica (cálculo) (kg/m³)	Baridade Máxima Teórica (picnómetro) (kg/m³)	Porosidade, V _m (%)	VMA (%)	VMA (%)	VFB (%)	VFB (%)
2.1	6,00	2383	2390	5,20	18,6	18,5	71,9	71,7
2.2	6,00				18,4		71,6	
2.3	6,00				18,5		71,8	
2.4	6,00				18,4		71,6	
3.1	6,50	2366	2334	3,00	17,4	17,4	82,9	82,9
3.2	6,50				17,4		82,9	
3.3	6,50				17,3		82,8	
3.4	6,50				17,4		82,9	
4.1	7,00	2350	2363	1,90	17,6	17,6	89,2	89,1
4.2	7,00				17,4		89,0	
4.3	7,00				17,5		89,1	
4.4	7,00				17,7		89,2	

➤ **Estudo da mistura betuminosa – Compressão Marshall**

Quadro I.5 Resultados do ensaio de Compressão de Marshall

Provete	Betume (%)	Estabilidade corrigida (kN)	Estabilidade corrigida (kN)	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
2.2	6,00	9	8,23	4,5	4,5
2.3	6,00	7,1		4,8	
2.4	6,00	8,6		4,2	
3.2	6,50	9,1	8,97	4	4,2
3.3	6,50	8,6		4,3	
3.4	6,50	9,2		4,3	
4.1	7,00	8,2	7,73	3,3	5,6
4.2	7,00	7,3		4,2	
4.3	7,00	7,7		9,3	

APÊNDICE II. Avaliação de desempenho mecânico

➤ Sensibilidade à água – Resistência Conservada

Quadro II.6 Composição dos provetes Marshall

Grupo de Amostras	Betume (%)	Massa Betume Novo (g)	4/16 (%)	Massa 4/16 (g)	0/4 (%)	Massa 0/4 (g)	Fíler (%)	Massa Fíler (g)	MBR 0/8 (%)	Massa MBR 0/8 (g)	MBR 8/16 (%)	Massa MBR 8/16 (g)	Total
1	6,3	63	62	695,2	10	112,1	8	89,7	8	96	12	144	1200
Total (g)*		504		5562		896,8		717,6		768		1152	9600

* Para cada grupo foram fabricadas oito amostras

Quadro II.7 Cálculo da baridade dos provetes Marshall para o ensaio de avaliação da sensibilidade à água

Proвете	Betume (%)	Altura Média (mm)	Diâm. (mm)	Pesado ao ar (g)	Selado Com Parafina (g)	Imerso em Água (g)	Temp. Água (°C)	Densidade da Água (kg/m³)	Baridade (kg/m3)
sa1	6,30	65,7	101,5	1144,1	639,0	1185,3	24,5	997,3	2284,2
sa2	6,30	65,6	101,5	1183,6	666,3	1218,8	24,5	997,3	2303,0
sa3	6,30	65,4	101,5	1170,4	657,7	1211,0	24,5	997,3	2301,3
sa6	6,30	65,6	101,5	1171,7	659,9	1210,4	24,5	997,3	2306,8
sa7	6,30	66,6	101,5	1178,8	660,0	1213,1	24,0	997,4	2286,8
sa8	6,30	64,7	101,5	1170,8	660,2	1203,5	24,0	997,4	2307,1

Quadro II.8 Resultados do ensaio de tração indireta e determinação de ITRS

Grupos	Provetes "a seco"			Provetes "imersos"		
	sa1	sa2	sa3	sa6	sa7	sa8
Características dos provetes						
Massa do provete (arredondado a 0,1g)	1144,1	1183,6	1170,4	1171,7	1178,8	1170,8
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)	65,7	65,6	65,4	65,6	66,6	64,7
Altura média (mm)	65,6			65,6		
Diferença entre a altura média dos dois grupos (arredondada a 0,1 mm) não deve exceder os 5mm	0,1					
Volume geométrico do provete (cm³)	531,6	530,8	529,2	530,8	538,9	523,5
Baridade geométrica média (g/cm³)	2,152	2,230	2,212	2,208	2,188	2,237
Massa do provete imerso em água (g)	639,0	666,3	657,7	659,9	660,0	660,2
Massa provete com parafina	1185,3	1218,8	1211,0	1210,4	1213,1	1203,5
Valor de K para correção	1,0002	1,0002	1,0002	1,0002	1	1
Baridade imersa (g/cm³)	2,284	2,303	2,301	2,307	2,287	2,307
Baridade imersa média (g/cm³)	2,296			2,300		
A diferença da baridade imersa média dos dois grupos de provetes (g/cm³) não deve exceder os 0,015 g/cm³ (15 kg/m³)	0,004					

Quadro II.9 (Continuação) – Resultados do ensaio de tração indireta e determinação de ITRS

Grupos	Provetes "a seco"			Provetes "imersos"		
	sa1	sa2	sa3	sa6	sa7	sa8
Características dos provetes						
Características dos provetes depois de vácuo						
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)	---	---	---	101,5	101,5	101,5
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)	---	---	---	65,6	66,6	64,7
Volume do provete (cm³)	---	--	---	530,8	538,9	523,5
O aumento do volume dos provetes após o vácuo não deve exceder 2%				531,0 (g/cm³)		
	NA			1,00%		
Ensaio de tração indireta EN 12697-23						
Tempo de condicionamento (h)	2h a 25°C			68 a 72h a 40°C e 2h a 25°C		
Temperatura de ensaio (°C)	25°C					
Resistência máxima (kN)	9,8	10,9	12	10,1	8,9	9,7
Resistência média (kN)	10,9			9,6		
Tração indireta ITS (GPa)	0,0009	0,001	0,0012	0,001	0,0008	0,0009
Tração indireta média ITS (GPa)	0,001043			0,000915		
Tração indireta média ITS (kPa)	1043			915		
Resistência Conservada em Tração Indireta ITRS (%)	88%					

➤ **Resistência à Deformação Permanente**

Quadro II.10 Propriedades geométricas e volumétricas dos provetes selecionados, ensaiados à deformação permanente

Proвете	Betume (%)	Altura (mm)	Altura média (mm)	Baridade (kg/m ³)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade Máxima Teórica (kg/m ³)	Baridade Máxima Teórica média (kg/m ³)	Porosidade, V _m (%)	Porosidade média, V _m (%)	VMA (%)	VMA médio (%)	VFB (%)	VFB médio (%)
2.3	6,0	57,6	60,7	2289	2254	2403	2392	5,0	5,7	18,3	18,9	72,7	69,9
2.4	6,0	62,0		2259		2388		5,7		18,9		69,7	
2.5	6,0	62,4		2215		2384		6,3		19,4		67,3	
3.1	6,5	58,3	60,3	2280	2266	2358	2368	3,4	4,3	17,8	18,6	80,8	76,9
3.3	6,5	58,7		2263		2379		5,1		19,4		73,6	
3.4	6,5	62,3		2268		2368		4,4		18,7		76,4	
3.5	6,5	62,2		2252		ND		ND		ND		ND	
4.1	7,0	60,9	60,0	2274	2270	2383	2361	4,8	4,0	20,2	19,5	76,3	79,4
4.3	7,0	58,7		2299		2375		3,3		18,9		82,4	
4.4	7,0	60,4		2237		2326		4,0		19,2		79,4	

ND: não determinado

Quadro II.11 Parâmetros de deformação permanente dos provetes ensaiados e selecionados

Proвете	Betume (%)	Altura (mm)	Altura média (mm)	Tensão máxima (kPa)	Deformação (mm)	Deformação média (mm)	ϵ_{3600} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{3600} médio ($\mu\epsilon$)	Def, ϵ_n (%)	Def média, ϵ_n (%)	Taxa de deformação, f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)	Taxa de deformação média, f_c ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$)	Módulo Resiliente (Mpa)	Módulo Resiliente médio (Mpa)
2.3	6,0	57,6	60,7	100	0,210	0,434	3649	7022	0,293	0,621	0,202	0,716	250	210
2.4	6,0	62,0		100	0,560		9025		0,787		0,928		191	
2.5	6,0	62,4		100	0,532		8392		0,781		1,018		191	
3.1	6,5	58,3	60,3	100	0,231	0,298	3970	4891	0,345	0,388	0,450	0,406	191	192
3.3	6,5	58,7		100	0,169		2883		0,281		0,407		184	
3.4	6,5	62,3		100	0,385		6191		0,415		0,325		192	
3.5	6,5	62,2		100	0,405		6520		0,509		0,442		201	
4.1	7,0	60,9	60,0	100	0,426	0,313	6990	5208	0,512	0,428	0,526	0,476	192	230
4.3	7,0	58,7		100	0,260		4433		0,429		0,604		176	
4.4	7,0	60,4		100	0,254		4202		0,343		0,298		323	

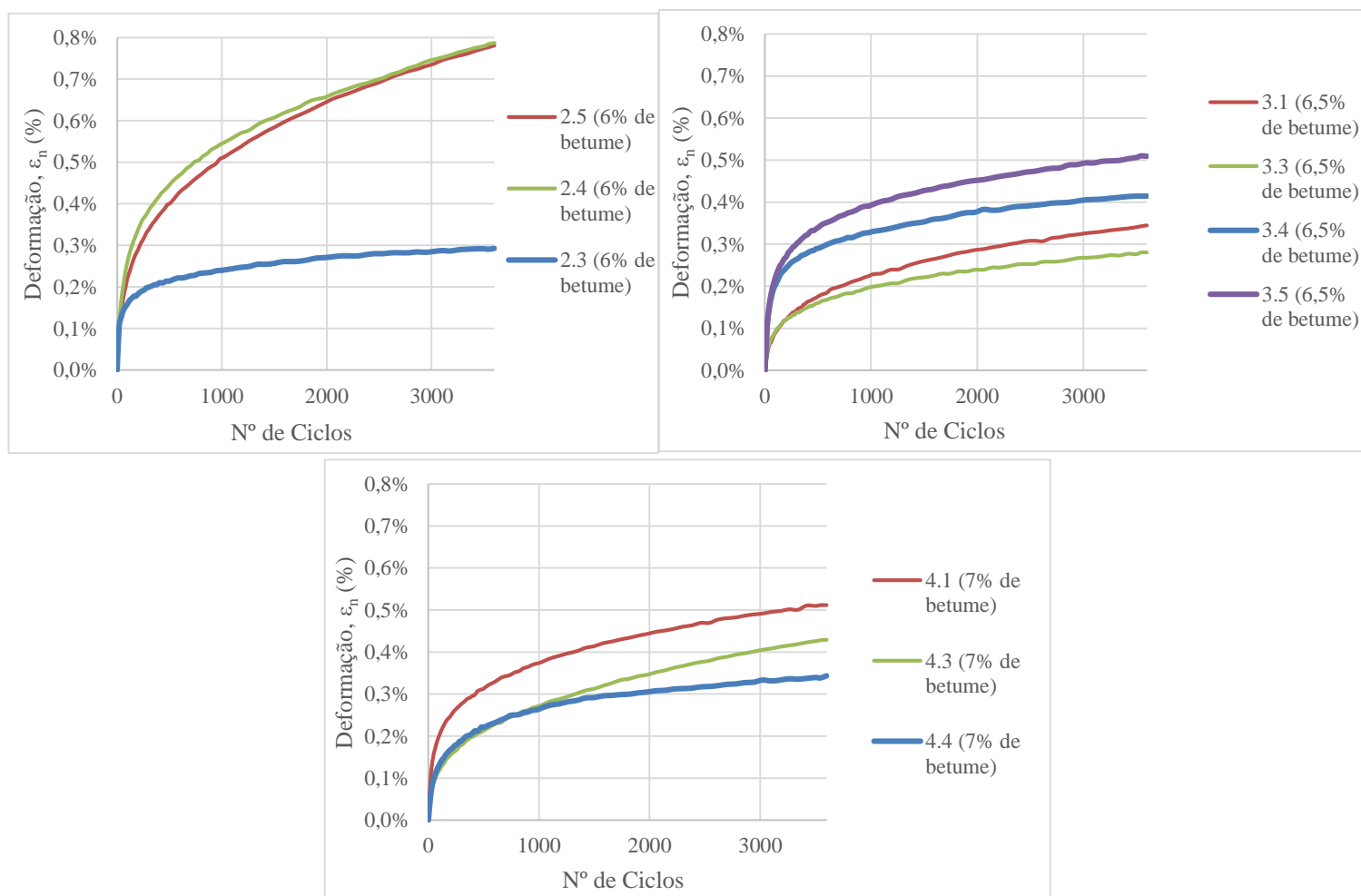


Figura II.1 Representação gráfica da deformação acumulada de cada provete ao longo dos ciclos de ensaio (para provetes seleccionados)

Quadro II.12 Quadro comparativo de ensaios de outros autores à deformação permanente

Tipo de mistura (Autor)	SMA 12,5, MBT em estudo	AC20, MBQ (Baptista, 2006)	AC20, MBQ (Baptista, 2006)	AC25, MBQ (Gardete, 2006)	AC 9,5, MBQ (Mounes et al, 2015)	AC 9,5, MBQ (Mounes et al, 2015)	SMA 14, MBQ (Pasetto et al, 2011)	SMA 14, MBQ (Pasetto et al, 2011)
Tipo de Agregados	Granito	Granito	Granito	Granito	Granito	Granito	Calcário	Calcário
Tipo de Betume	35/50	35/50	35/50	50/70	80/100	80/100	pen ₂₅ =46	pen ₂₅ =46
Tipo de reciclagem e quantidade	MBR, 20%	MBR, 20%	--	--	Malha de fibra de vidro	--	--	Escórias de aço, 26%
% de betume	6,50%	4,20%	4,20%	4,70%	5,00%	5,00%	5,50%	5,58%
Aditivo	Viatop CT40	--	--	--	--	--	SBS	SBS
Temperatura de ensaio	60°C	45°C	45°C	45°C	40°C	40°C	40°C	40°C
Carga	100 kPa	150 kPa	150 kPa	150 kPa	100 kPa	100 kPa	100 kPa	100 kPa
Ciclos	3600	3600	3600	3600	10000	10000	3600	3600
Porosidade	4,80%	4,40%	3,50%	3,20%	8,36%	8,23%	4,00%	4,00%
Deformação axial acumulada, e ₃₆₀₀ (με)	4891	12109	12183	6304	6700*	9900*	7481	5630

* Valor aproximado após leitura da curva de deformação no ciclo 3600

➤ **Avaliação do Módulo de Rigidez**

Quadro II.13 Propriedades geométricas e volumétricas dos provetes de 150 mm de diâmetro, ensaiados à avaliação do módulo de rigidez

Proвете	Betume (%)	Altura (mm)	Altura média (mm)	Baridade (kg/m ³)	Baridade média (kg/m ³)	Baridade Máxima Teórica (kg/m ³)	Baridade Máxima Teórica média (kg/m ³)	Porosidade, V _m (%)	Porosidade média, v _m (%)	VMA (%)	VMA médio (%)	VFB (%)	VFB médio (%)
2.4	6,0	62,0	62,2	2259	2237	2388	2386	5,7	6,0	18,9	19,1	69,7	68,5
2.5	6,0	62,4		2215		2384		6,3		19,4		67,3	
3.4	6,5	62,3	62,2	2268	2260	2368	2368	4,4	4,4	18,7	18,7	76,4	76,4
3.5	6,5	62,2		2252		ND		ND		ND		ND	
4.4	7,0	60,4	60,6	2237	2244	2326	2345	4,0	4,5	19,2	19,7	79,4	77,3
4.5	7,0	60,9		2251		2364		5,0		20,3		75,3	

Quadro II.14 Quadro resumo do ensaio de avaliação do módulo de rigidez (IT-CY), dos provetes de 100 mm de diâmetro, para 1 Hz de frequência

Provetes 6 % betume - Frequência 1 Hz (Tempo de carga = 150ms)									
Provetes	Ângulo de carga	Módulo de Rigidez Ajustado (MPa)	Fator de área de carga	Def. de Pico (µm)	Carga de Pico (N)	Tensão de tração (kPa)	Tempo de carga (ms)	Diferença entre módulos (%)	Módulo de Rigidez final (MPa)
2.1	0°	6898	0,53	4,4183	3413,9	322	77,2	-2,2	6974,0
	90°	7050	0,54	4,0066	3154,4	298	71,8		
2.2	0°	5923	0,53	5,3579	3423,7	335	76,4	-4,2	6047,0
	90°	6171	0,53	4,4511	2958,6	290	74,4		
2.3	0°	6541	0,53	4,964	3513,3	344	77,4	5,0	6376,5
	90°	6212	0,52	4,3981	2987,5	292	74,6		
2.4	0°	7037	0,53	4,9756	3782,9	370	76,8	5,8	6834,5
	90°	6632	0,53	4,744	3414,4	334	75,4		
2.10	0°	8599	0,53	5,2211	4867,5	476	76,6	14,3	7986,0
	90°	7373	0,53	5,055	4045,6	396	73,2		
2.11	0°	8268	0,53	5,1516	4626,6	453	76,6	-2,9	8387,0
	90°	8506	0,53	4,8911	4519,1	442	74,8		
2.12	0°	8888	0,53	5,359	5141,1	503	76,2	-1,9	8974,5
	90°	9061	0,54	5,0152	4904,3	479	77		
Provetes 6,5 % betume - Frequência 1 Hz (Tempo de carga = 150ms)									
3.1	0°	6285	0,53	4,6794	3098,5	312	73,6	14,9	5818,0
	90°	5351	0,53	4,9696	2815,1	283	73		
3.2	0°	7879	0,54	5,009	4200,3	418	76,8	15,1	7283,5
	90°	6688	0,53	5,2561	3751,2	373	77,2		
3.3	0°	5037	0,53	5,4641	2966	292	75,6	7,4	4850,5
	90°	4664	0,55	4,1002	2034,4	200	71		
3.4	0°	5962	0,54	4,8405	3141,1	304	77,4	-4,0	6080,5
	90°	6199	0,53	4,9472	3349,9	324	76,6		
3.10	0°	6559	0,53	5,346	3725,4	368	73,2	-9,0	6853,5
	90°	7148	0,53	4,7886	3669,5	363	73,6		
3.12	0°	5929			3175,2	297		6,3	5741,5
	90°	5554			3297,6	308			
Provetes 7 % betume - Frequência 1 Hz (Tempo de carga = 150ms)									
4.1	0°	6691	0,53	5,1316	3714	363	76,8	18,7	6064,0
	90°	5437	0,54	5,2512	3065,6	300	75,4		
4.2	0°	5986	0,53	4,8144	3029,1	305	75,0	1,8	5933,5
	90°	5881	0,54	4,6963	2884,1	290	75		
4.3	0°	6782	0,52	4,8954	3615,7	352	74,0	6,1	6574,5
	90°	6367	0,54	4,8261	3337,6	325	76,8		
4.4	0°	6444	0,53	4,3504	2977,4	297	74,0	17,0	5895,5
	90°	5347	0,53	4,8157	2700,6	269	72,8		
4.10	0°	6180			2464,7	236		20,6	5543,0
	90°	4906			2621,2	251			
4.11	0°	5625			3250,6	318		11,1	5313,5
	90°	5002			3216,5	314			
4.12	0°	6078	0,54	5,0803	3007,8	294	72	9,4	5793,0
	90°	5508	0,52	5,6983	3768,5	368	72		

Quadro II.15 Quadro resumo do ensaio de avaliação do módulo de rigidez (IT-CY), dos provetes de 100 mm de diâmetro, para 2 Hz de frequência

Provetes 6 % betume - Frequência 2 Hz (Tempo de carga = 75ms)									
Provete	Ângulo de carga	Módulo de Rigidez Ajustado (MPa)	Fator de área de carga	Def. de Pico (µm)	Carga de Pico (N)	Tensão de tração (kPa)	Tempo de carga (ms)	Diferença entre módulos (%)	Módulo de Rigidez final (MPa)
2.1	0°	6322	0,53	4,8124	3414,7	322	42,4	4,5	6180,5
	90°	6039	0,52	4,7834	3266,4	308	43,4		
2.2	0°	6693	0,52	5,2528	3841,6	376	44,6	19,9	6028,0
	90°	5363	0,50	4,7399	2792,5	274	42,8		
2.3	0°	8633	0,52	4,0489	3815	373	45,2	18,3	7843,5
	90°	7054	0,52	4,9775	3826,5	374	44,2		
2.4	0°	7163	0,52	4,6000	3587,2	351	44,0	11,8	6740,0
	90°	6317	0,52	4,3344	2989,2	293	42,0		
2.10	0°	8425			4618,7	452		-6,8	8710,0
	90°	8995			5201,5	509			
2.11	0°	9899			5253	514		15,6	9129,0
	90°	8359			4591,4	449			
2.12	0°	10636			5882	578		9,4	10135,5
	90°	9635			5036,6	495			
Provetes 6,5 % betume - Frequência 2 Hz (Tempo de carga = 75ms)									
3.1	0°	5774	0,53	5,1489	3342,7	316	43,0	-0,2	5778,5
	90°	5783	0,52	4,5116	2946,4	278	42,4		
3.2	0°	7713	0,52	4,8023	3981	396	45,2	14,4	7156,0
	90°	6599	0,54	6,6248	4609,8	459	47,8		
3.3	0°	6374	0,52	3,8775	2682	264	41,2	-10,5	7156,0
	90°	7046	0,53	6,2681	4769,3	469	50,8		
3.4	0°	8943	0,52	4,0925	4056	394	45,6	10,3	8480,5
	90°	8018	0,52	4,2063	3729,6	362	42,8		
3.10	0°	7587			3951,8	391		12,8	7102,0
	90°	6617			3590,9	355			
3.12	0°	7858			4165,1	390		17,3	7180,0
	90°	6502			5217,8	488			
Provetes 7 % betume - Frequência 2 Hz (Tempo de carga = 75ms)									
4.1	0°	7110	0,52	5,0074	3880,9	379	44,8	11,5	6699,5
	90°	6289	0,52	4,5978	3165,7	309	42,0		
4.2	0°	5879	0,52	4,6715	2914,2	293	41,6	5,7	5712,5
	90°	5546	0,53	4,3803	2560,8	258	40,0		
4.3	0°	8852	0,54	5,1490	4957,9	482	50,8	6,4	8568,0
	90°	8284	0,54	4,8898	4407,3	429	46,4		
4.4	0°	6511	0,52	5,2436	3664,5	365	43,8	9,5	6203,0
	90°	5895	0,51	4,9998	3167,9	316	43,0		
4.10	0°	6981			4155,9	398		16,4	6409,5
	90°	5838			3157,3	302			
4.11	0°	6959			3643,7	356		5,0	6786,0
	90°	6613			3655	357			
4.12	0°	6695			3633,5	355		-2,8	6787,5
	90°	6880			3531,6	345			

Quadro II.16 Quadro resumo do ensaio de avaliação do módulo de rigidez (IT-CY), dos provetes de 100 mm de diâmetro, para 3 Hz de frequência

Provetes 6 % betume - Frequência 3 Hz (Tempo de carga = 50ms)									
Provete	Ângulo de carga	Módulo de Rigidez Ajustado (MPa)	Fator de área de carga	Def. de Pico (µm)	Carga de Pico (N)	Tensão de tração (kPa)	Tempo de carga (ms)	Diferença entre módulos (%)	Módulo de Rigidez final (MPa)
2.1	0°	6758	0,53	4,336	3298,3	311	32,8	-8,2	7034,0
	90°	7310	0,52	4,5222	3724,1	352	35,5		
2.2	0°	6803	0,51	4,346	3250,1	318	34	2,6	6716,0
	90°	6629	0,53	4,4334	3190,1	313	32		
2.3	0°	6819	0,51	4,1513	3126	306	33	2,4	6736,5
	90°	6654	0,53	4,872	3527,7	345	34,2		
2.4	0°	7632	0,53	4,1877	3447,9	338	34,2	8,4	7312,0
	90°	6992	0,53	4,4812	3406,4	334	33,6		
2.10	0°	11970			4856,7	476		14,3	11112,0
	90°	10254			4827,4	472			
2.11	0°	10869			4879,6	478		20,6	9749,0
	90°	8629			4354	426			
2.12	0°	10604			4766,6	468		-11,5	11215,0
	90°	11826			4516,8	444			
Provetes 6,5 % betume - Frequência 3 Hz (Tempo de carga = 50ms)									
3.1	0°	8240	0,52	4,1607	3640,8	366	34,6	0,1	8235,5
	90°	8231	0,52	4,2433	3697,1	372	35		
3.2	0°	8466	0,53	3,9414	3561,4	354	34,4	4,8	8262,0
	90°	8058	0,53	4,0549	3471,7	345	33,4		
3.3	0°	6334	0,52	5,0252	3461,1	340	34,6	-0,6	6354,5
	90°	6375	0,52	4,6726	3242,3	319	32,8		
3.4	0°	9709	0,52	3,6412	3881,5	377	37,4	12,8	9089,0
	90°	8469	0,52	3,9613	3677,6	357	34,8		
3.10	0°	9011			4572	452		-12,7	9582,0
	90°	10153			4847,7	479			
3.12	0°	6975			3868,7	363		9,8	6632,5
	90°	6290			3577	335			
Provetes 7 % betume - Frequência 3 Hz (Tempo de carga = 50ms)									
4.1	0°	7666	0,53	4,263	3513,7	343	33,6	-5,2	7863,5
	90°	8061	0,52	4,3764	3847	376	34,8		
4.2	0°	6433	0,53	5,6283	3809	383	34,4	-8,4	6704,0
	90°	6975	0,52	5,1721	3838,3	386	36,2		
4.3	0°	7313	0,53	3,9822	3105,6	309	31,2	19,8	6589,5
	90°	5866	0,51	5,1448	3252,4	324	33,2		
4.4	0°	10809	0,53	3,4453	3955,8	394	36,2	12,3	10145,0
	90°	9481	0,53	3,987	4019,7	400	36,6		
4.10	0°	7997			4337	415		-1,7	8065,5
	90°	8134			4184,5	401			
4.11	0°	8508			4859,5	475		20,3	7645,5
	90°	6783			3544,9	346			
4.12	0°	7347			4065,7	397		11,1	6938,5
	90°	6530			3744,8	366			

Quadro II.17 Quadro resumo do ensaio de avaliação do módulo de rigidez (IT-CY), dos provetes de 150 mm de diâmetro, para todas as frequências

Provete	Betume (%)	Ângulo de carga	Frequência 1 Hz (Tempo de carga = 150ms)				
			Módulo de Rigidez Ajustado (MPa)	Carga de Pico (N)	Tensão de tração (kPa)	Diferença entre módulos (%)	Módulo de Rigidez final (MPa)
2.4	6,0	0°	6107	4554	309	4,8	5959,0
		90°	5811	4228,2	286		
2.5	6,0	0°	5195	3982,5	264	5,5	5051,0
		90°	4907	3778,8	250		
3.4	6,5	0°	4624	3162	213	21,3	4132,0
		90°	3640	2897,5	196		
3.5	6,5	0°	5684	3929,3	266	3,8	5575,5
		90°	5467	3963	268		
4.4	7,0	0°	7509	6524,6	454	11,9	7063,0
		90°	6617	4891,4	340		
4.5	7,0	0°	4687	3066,8	212	23,1	4146,5
		90°	3606	2383,9	164		
Provete	Betume (%)	Ângulo de carga	Frequência 2 Hz (Tempo de carga = 75ms)				
			Módulo de Rigidez Ajustado (MPa)	Carga de Pico (N)	Tensão de tração (kPa)	Diferença entre módulos (%)	Módulo de Rigidez final (MPa)
2.4	6,0	0°	6009	4601,6	312	-1,5	6053,0
		90°	6097	4439,9	301		
2.5	6,0	0°	5601	4067,5	259	18,7	5076,5
		90°	4552	3579,9	237		
3.4	6,5	0°	5848	3800,2	257	-6,9	6051,0
		90°	6254	4337,7	293		
3.5	6,5	0°	6324	4219,6	285	-9,5	6623,0
		90°	6922	4723,5	319		
4.4	7,0	0°	7274	4354,9	303	-8,2	7571,0
		90°	7868	5190,4	361		
4.5	7,0	0°	6497	4431,1	306	-17,5	7067,0
		90°	7637	4002,8	276		
Provete	Betume (%)	Ângulo de carga	Frequência 3 Hz (Tempo de carga = 50ms)				
			Módulo de Rigidez Ajustado (MPa)	Carga de Pico (N)	Tensão de tração (kPa)	Diferença entre módulos (%)	Módulo de Rigidez final (MPa)
2.4	6,0	0°	7473	4017,7	272	15,3	6900,5
		90°	6328	3918,2	265		
2.5	6,0	0°	5589	3648,8	242	-2,1	5646,5
		90°	5704	3934,7	261		
3.4	6,5	0°	7788	4005,4	270	7,8	7484,0
		90°	7180	4037	273		
3.5	6,5	0°	8260	4038,9	273	-4,7	8455,5
		90°	8651	4008,8	271		
4.4	7,0	0°	6942	4057,7	282	-9,9	7286,5
		90°	7631	4060,3	283		
4.5	7,0	0°	8021	4036,6	279	6,2	7772,5
		90°	7524	3708,2	256		

Quadro II.18 Características geométricas e baridade das vigas ensaiadas à avaliação do módulo de rigidez por 4PB-PR

Betume (%)	Provete	Comp. (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Massa (g)	Baridade (kg/m³)
6,5	viga 1	399	50,15	48,98	2137	2313
	viga 2	397	49,52	48,94	2035	2307
	viga 3	399	52,38	48,89	2217	2302
	viga 4	397	50,73	48,57	2138	2297
	viga 5	397	50,45	48,80	2124	2310

Quadro II.19 Resultados do ensaio de avaliação do módulo de rigidez por 4PB-PR

Módulo Rigidez, E (MPa)							
Betume (%)	provete	Frequência (Hz)					
		1	3	5	10	20	30
6,5	v1	3166	4121	4644	5387	6150	6573
	v2	2617	3412	3841	4480	5156	5514
	v3	2850	3610	4162	4786	5457	5946
	v4	2995	3842	4379	5171	5960	6409
	v5	3025	3869	4426	5182	6036	6463
Tensão, σ (kPa)							
Betume (%)	provete	Frequência (Hz)					
		1	3	5	10	20	30
6,5	v1	157	204	231	267	306	329
	v2	131	171	192	223	255	274
	v3	141	175	206	238	271	297
	v4	149	193	218	257	297	320
	v5	150	193	221	258	299	323
Ângulo de fase, ϕ (°)							
Betume (%)	provete	Frequência (Hz)					
		1	3	5	10	20	30
6,5	v1	24,9	22,5	21,8	18,4	13,7	10,0
	v2	25,2	21,1	20,3	17,2	13,4	7,3
	v3	25,5	20,1	20,3	16,5	12,2	8,9
	v4	25,3	20,7	20,4	16,9	11,9	8,6
	v5	24,9	19,7	20,5	17,2	12,5	8,7

Quadro II.20 Quadro comparativo de ensaios de outros autores à avaliação do módulo de rigidez por IT-CY

Tipo de mistura (Autor)	SMA 12,5, MBT (em estudo)	SMA 14, MBQ (Pasetto. M, 2011)	SMA 14, MBQ (Pasetto. M, 2011)	AC 11, MBQ (Tóth Mba, et al., 2015)
Tipo de Agregados	Granito	Calcário	Calcário	Calcário
Tipo de Betume	35/50	Pen ₂₅ =46	Pen ₂₅ =46	50/70
Tipo de reciclagem e quantidade	MBR, 20%	Escórias de aço, 26%	--	--
% de betume	6,50%	5,58%	5,50%	--
Aditivos	Viatop CT40	SBS	SBS	VIATOP® plus FEP
Tipo de Provete - Diâmetro	100mm	100mm	100mm	100mm
Temperatura de ensaio	20°C	20°C	20°C	20°C
Deformação Alvo	5µm	5µm	5 µm	5 µm
Tempo de carregamento	124ms	124ms	124ms	124ms
Porosidade	2,60%	4,00%	4,00%	--
E (MPa)	6623*	4693	3950	6530

*Obtido para o tempo de carregamento 124ms, através de interpolação linear entre os tempos de carregamento 150ms (1 Hz) e 75ms (2 Hz)

